

Bakalářská práce

Závislost pevnosti lepených spojů na vnějších podmínkách

Jméno autora:

Dominik Kubíček

Rok odevzdání:

2021

Zadání bakalářské práce

Student:

Dominik Kubíček

Studijní program:

B3923 Materiálové inženýrství

Studijní obor:

3911R034 Materiály a technologie pro automobilový průmysl

Téma:

Závislost pevnosti lepených spojů na vnějších podmínkách
External conditions effect on the strength of glued joints

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky lepených spojů.
2. Popis technologie lepení.
3. Zkoušení lepených spojů.
4. Návrh a realizace experimentálního plánu.
5. Zhodnocení a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČERMÁKOVÁ, Adriana. Ověření technologií lepení pro hliníkové slitiny [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/119487>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [2] VYBÍRAL, Daniel. Vliv technologie přípravy povrchu na pevnost lepeného spoje [online]. Ostrava, 2018 [cit. 2020-10-02]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/128917>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [3] PIZZI, A., MITTAL, K. L.: Handbook of adhesive technology. New York, Dekker New York, 2003.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Miroslav Suchánek**

Datum zadání: 30.11.2020

Datum odevzdání: 30.04.2021

doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Abstrakt

Teoretická část bakalářské práce zpracovává literární studii o technologii lepení. Pojednává o klíčových vlastnostech lepidel, jejich rozdělení, využití v automobilovém průmyslu, konstrukcích lepených spojů a zkouškách pevnosti.

Experimentální část bakalářské práce se zabývá závislostí pevnosti lepených spojů na vnějších podmínkách. Stykové plochy hliníkových vzorků jsou očištěny laserem. Lepí se dvěma typy lepidel, 3M 7260 B/A FC a lepidlem Würth POWERBOND. Je zkoumán vliv působení rozdílných teplot a vlhkostí prostředí na smykovou pevnost spoje a Youngův modul pružnosti. Smyková pevnost je zjišťována trhací tahovou zkouškou dle normy ČSN EN 1465 a Youngův modul pružnosti vychází z Hookova zákona.

Klíčová slova:

Lepení; lepený spoj; smyková pevnost; automobilový průmysl; Youngův modul pružnosti.

Abstract

The theoretical part of the bachelor's thesis processes literary studies on gluing technology. Discussing the key properties of adhesives, their distribution, utilization in the automotive industry, designing of adhesive joints and their strength tests.

Experimental part of the bachelor thesis deals with the dependence of the strength of glued joints on external conditions. The contact surfaces of aluminum samples are cleaned by a laser. The joint is glued with two types of adhesives, 3M 7260 B / A FC and Würth POWERBOND glue. It is a test of the effect of different temperatures and humidity on the shear strength of joints and Young's modulus of elasticity. The shear strength is determined by a tensile test according to the ČSN EN 1465 standard and Young's modulus of elasticity is based on Hook's law.

Key words:

Gluing; adhesive joint; shear strength; automotive industry; Young's modulus of elasticity.

Poděkování

Tímto děkuji Ing. Suchánkovi za podnětné rady, cenné připomínky, vstřícnost a profesionální vedení mé bakalářské práce. Dále chci poděkovat svým rodičům za jejich dlouholetou podporu a trpělivost.

Seznam použitých veličin:

Značení:	Název veličiny:	Jednotka:
α	Kontaktní úhel kapky lepidla	[deg]
τ	Pevnost ve smyku	[MPa]
F_{MAX}	Maximální tahová síla	[N]
S	Plocha lepeného spoje	[mm ²]
P _s	Střední odlupovací pevnost	[N/mm]
F _{SO}	Střední odlupovací síla	[N]
A _n	Rázová pevnost	[J/cm ²]
Δl	Prodloužení	[mm]
E	Youngův modul pružnosti	[MPa]
F ₁₀₀₀	Síla v platnosti hookova zákona; zvolena na 1000 N	[N]
Δl_{1000}	Prodloužení vzorku při zátěži 1000 N	[mm]
l_o	Počáteční délka vzorku	[mm]

Obsah

Úvod	11
1. Teorie lepení	12
1.1. Adheze	12
1.2. Smáčivost	14
1.3. Polarita	15
1.4. Koheze	15
2. Vlastnosti lepidel	16
2.1. Složení a tvar makromolekuly	16
2.2. Polymerace	16
2.3. Viskozita	16
2.4. Kyselost a zásaditost	16
2.5. Homogenita	17
2.6. Objemové změny filmu lepidla	17
2.7. Složení a struktura plniva	17
3. Lepidla a jejich rozdělení	19
3.1. Dle chemické struktury	19
3.1.1. Lepidla na anorganické bázi	19
3.1.2. Lepidla na bázi silikonů	19
3.1.3. Lepidla na organické bázi	19
3.2. Dle druhu vytvrzovací reakce	20
3.2.1. Polykondenzační reakce	21
3.2.2. Polymerační reakce	21
3.2.3. Polyadiční reakce	21
3.3. Dle fyzikální podstaty	21
3.3.1. Kapalná lepidla	21
3.3.2. Plastická lepidla	21
3.3.3. Tuhá lepidla	22
3.4. Dle počtu složek	22
3.4.1. Jednosložková lepidla	22
3.4.2. Vícesložková lepidla	22
3.5. Lepidla v automobilovém průmyslu	25
3.5.1. Epoxidová lepidla	26
3.5.2. Kaučuková lepidla	27

4. Lepení v automobilovém průmyslu	29
4.1. Lepení karoserie.....	29
4.2. Kombinování lepení s ostatními způsoby spojování	30
4.4. Přednosti a nedostatky lepených spojů	31
5. Technologie lepení	33
5.1. Základní typy lepeného spoje	35
5.2. Pravidla konstrukce lepených spojů	36
5.3. Technologický postup lepení	37
5.3.1. Příprava adherentu na lepení	37
5.3.2. Příprava lepidla.....	39
5.3.3. Nanášení lepidla	39
5.3.4. Montáž spoje	40
6. Zkoušky lepených spojů.....	42
6.1. Zkouška pevnosti ve smyku při zatěžování tahem dle ČSN EN 1465	42
6.2. T-zkouška v odlupování slepů z ohebných adherentů dle ČSN EN 14 173	43
6.3. Zkušební metoda pro hodnocení rázové pevnosti lepených spojů ve smyku dle ČSN EN ISO 9653.....	44
6.4. Pevnost ve smyku při dlouhodobém staticky působícím zatížení	44
6.5. Hodnocení typu porušení lepeného spoje	44
6.6. Vliv teploty prostředí na pevnost lepidel	45
Experimentální část.....	47
7. Návrh experimentálního plánu	48
7.1. Testovací vzorky	49
7.2. Očistění vzorků	50
7.3. Příprava lepicího prostředí.....	52
7.4. Příprava a nanášení lepidla	53
7.5. Montáž spoje.....	54
8. Zkoušky závislosti na teplotě.....	56
8.1. Teplotní zkoušky lepidla 3M 7260 B/A FC.....	59
8.1.1. Lepidlo A při -10 °C.....	59
8.1.2. Lepidlo A při 5 °C	61
8.1.3. Lepidlo A při 20 °C	63
8.1.4. Lepidlo A při 35 °C	65
8.1.5. Lepidlo A při 50 °C	67
8.1.6. Lepidlo A při 65 °C	69
8.1.7. Lepidlo A při 80 °C	71
8.1.8. Shrnutí výsledků teplotních zkoušek lepidla 3M 7260 B/A FC.....	73

8.2.	Teplotní zkoušky lepidla Würth POWERBOND	76
8.2.1.	Lepidlo B při -10 °C	76
8.2.2.	Lepidlo B při 5 °C	78
8.2.3.	Lepidlo B při 20 °C	80
8.2.4.	Lepidlo B při 35 °C	82
8.2.5.	Lepidlo B při 50 °C	84
8.2.6.	Lepidlo B při 65 °C	86
8.2.7.	Lepidlo B při 80 °C	88
8.2.8.	Shrnutí výsledků teplotních zkoušek lepidla Würth POWERBOND	90
9.	Zkouška závislosti na vlhkosti prostředí	93
9.1.	Zkoušky závislosti pevnosti lepidla 3M 7260 B/A FC na vlhkosti prostředí	94
9.1.1.	Lepidlo A při vlhkosti prostředí 40 %	94
9.1.2.	Lepidlo A při vlhkosti prostředí 70 %	96
9.1.3.	Lepidlo A při vlhkosti prostředí 95 %	98
9.1.4.	Shrnutí výsledků zkoušek vlhkosti lepidla 3M 7260 B/A FC.....	100
9.2.	Zkoušky závislosti pevnosti lepidla Würth POWERBOND na vlhkosti prostředí..	103
9.2.1.	Lepidlo B při vlhkosti prostředí 40 %	103
9.2.2.	Lepidlo B při vlhkosti prostředí 70 %	105
9.2.3.	Lepidlo B při vlhkosti prostředí 95 %	107
9.2.4.	Shrnutí výsledků zkoušek vlhkosti lepidla Würth POWERBOND	109
	Závěr	112
	SEZNAM OBRÁZKŮ	115
	SEZNAM TABULEK	119
	SEZNAM VZORCŮ	120
	SEZNAM POUŽITÝCH LITERÁRNÍCH ZDROJŮ	121
	SEZNAM PŘÍLOH	123

Úvod

Historie lepení sahá až do dob pradávných, kdy lidé k lepení používali přírodní látky (např. vaječné bílky, pryskyřici, kostní či kožní kliš, jíl nebo kaučuk). Razantní pokrok technologie lepení ovšem nastal až s rozvojem chemického průmyslu. Byly vyvinuty nové typy lepidel získaných úpravou přírodních látek a dále také syntetická lepidla.

Lepené spoje dnes můžeme najít v téměř v každém průmyslovém odvětví. Dříve doplňková technologie se stává neodmyslitelnou součástí praxe. V současnosti jsou lepené spoje schopné plnohodnotně nahradit běžné spojovací metody jako jsou např. svarové, šroubové či nýtované spoje. V porovnání s těmito technologiemi lepení nabízí mnoho výhod. Lepený spoj disponuje lepší těsností a kohezní odolností. Při lepení nedochází k tepelnému namáhání spoje a nevznikají deformace zaviněné vnitřním pnutím a nejsou ovlivněny mechanické vlastnosti spojovaných materiálů. Lepení je vysoce efektivní a ekonomicky výhodné. Nutné je ale podotknout, že pro každý druh lepeného spoje je nutné použít vhodné lepidlo a vhodnou technologii.

Pevnost lepeného spoje závisí na mnoha podmínkách. Tato práce se zabývá měřením výsledné pevnosti spoje v závislosti na okolních podmínkách, zejména na teplotě a vlhkosti.

1. Teorie lepení

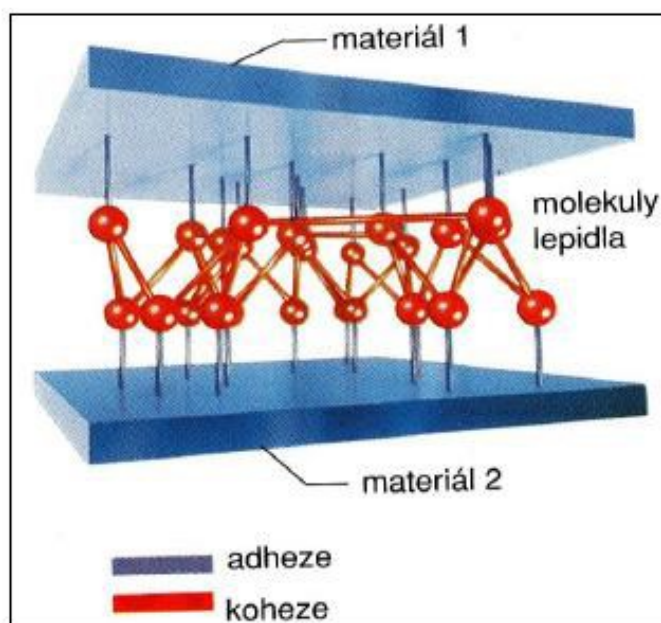
Lepení označujeme technologický postup pro vytváření nerozebíratelných nebo částečně rozebíratelných spojů součástí stejných nebo rozdílných materiálů pomocí přídatných látek zvaných lepidla.

Pro dosažení pevného spoje je potřeba, aby lepicí vrstva splňovala následující podmínky:

- mezifázové spojení mezi lepidlem a plochou lepeného materiálu (**adheze**)
- vytvoření tuhé fáze lepeného spoje (**koheze**)
- schopnost rovnoměrně pokrýt plochu lepeného povrchu (**smáčivost**) [1]

1.1. Adheze

Adheze je vzájemná přitažlivost dvou povrchů mezimolekulárními silami označované rovněž jako van der Waalsovy síly, které jsou stěžejní pro vytvoření spojení. Bez dostatečné adheze se spoj rozlepí v bodě styku lepidla a lepeného materiálu. Tento případ ukazuje, že vnitřní soudržnost lepidla (koheze) a pevnost samotného lepeného materiálu je vyšší než přilnavost (adheze). [1]

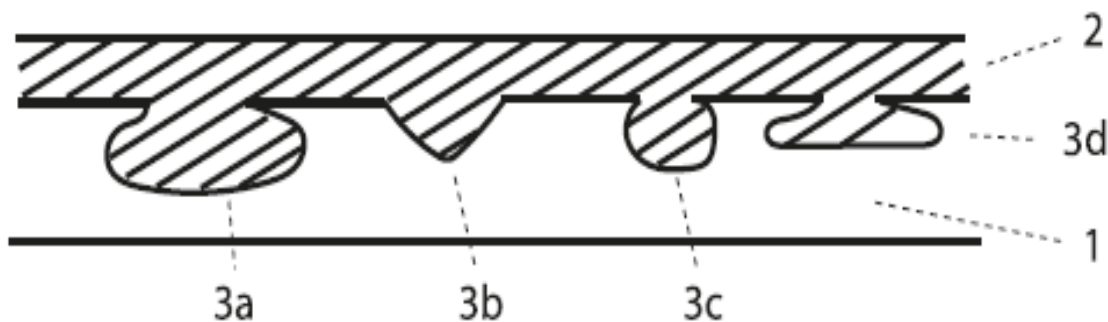


Obr. 1.1: Adheze a koheze lepidla a lepeného materiálu [3]

Existují dva teoretické modely vazeb toho, jak vznikají adhezivní spojení mezi lepidlem a lepeným povrchem:

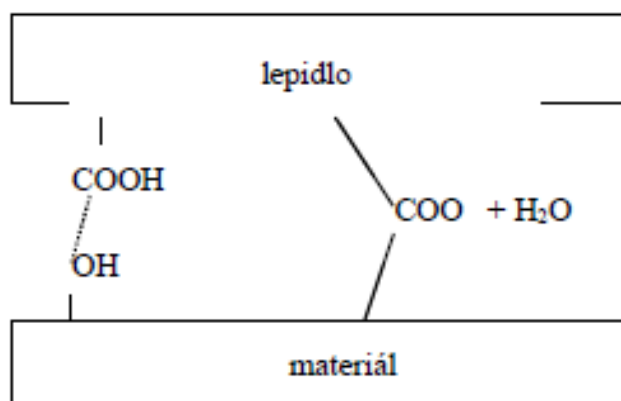
- mechanická vazba
- chemická (specifická) vazba [1]

Mechanická vazba se využívá zejména u materiálů s větší drsností, než jakou jsou schopné působit van der Waalsovy síly. Proto je nutné, aby použité lepidlo mělo nízkou viskozitu a mohlo tak proniknout do otevřených pórů, štěrbin a dalších dutin a zajistilo dokonalé smáčení. K pevnému spojení lepidla a lepeného materiálu dojde až po úplném ztuhnutí lepidla. [1]



Obr. 1.2: Princip vytvoření mechanické vazby (1 – lepený materiál, 2 – lepidlo, 3 – dutiny povrchu, 3a – hluboká vnitřní dutina, 3b – kolmá dutina, 3c – kulová dutina, 3d – plochá vnitřní dutina) [2]

Chemická (specifická) vazba se využívá u drsných i u zcela hladkých povrchů. Tento teoretický model se zabývá kovalentními vazbami i van der Waalsovými silami, kdy závisí zejména na chemickém působení lepidla na lepený povrch. Chemická reakce mezi lepidlem a lepeným povrchem za účelem vzniku kovalentních vazeb může proběhnout pouze u materiálů s reaktivním povrchem, nebo s povrchem chemicky aktivovaným. Metoda je vhodná pro lepení přírodních polymerů (dřevo, papír, celulóza) a oxidovaných povrchů (kovy, plasty). Použité lepidlo musí obsahovat volné chemické skupiny (např. oxidy, hydroxidy, karbonyly, aminokyseliny), které jsou schopné reagovat s povrchem lepeného materiálu. [1]



Obr. 1.3: Princip vytvoření chemické vazby [2]

1.2. Smáčivost

Smáčivost je rovněž velmi důležitým faktorem při konstruování lepených spojů. Chápeme ji jako schopnost lepidla rovnoměrně pokrýt plochu lepeného materiálu. Při nedosažení požadované smáčivosti a tím nedokonalého pokrytí povrchu, nemusí dojít k navázání adhezní vazby a spoj se rozpadne. [1]

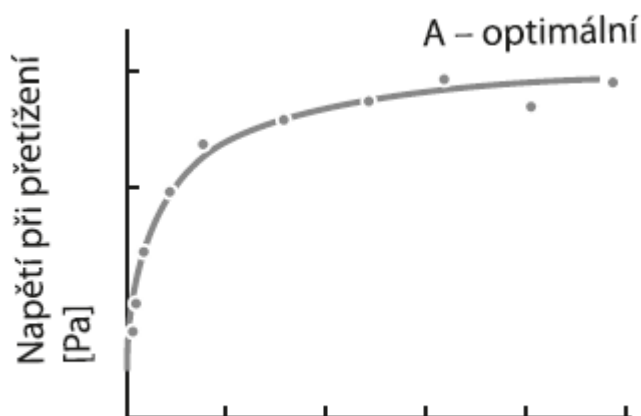
Schopnost lepidla smáčet tuhý povrch lze charakterizovat adhezním napětím. Při smáčení tuhého tělesa kapalinou je zapotřebí, aby síly způsobující povrchové napětí lepeného materiálu byly vyšší než povrchové napětí lepidla. Výsledné adhezní napětí lze získat stanovením povrchového napětí lepidla a změřením kontaktního úhlu α . [2]



Obr. 1.4: Smáčivost lepidel [2]

Na základě obrázku 1.4 můžeme konstatovat, že čím menší bude mít lepidlo úhel smáčení, tím lepší bude smáčivost. Nízká smáčivost lepidla však neznamená, že nebude možné pokrýt celou plochu lepeného povrchu materiálu. Za působení tlaku jsou schopná pokrýt lepený povrch i lepidla s větším kontaktním úhlem α . [2]

Dalším faktorem ovlivňujícím pevnost spoje je čas tuhnutí. Také v případě lepidla s kontaktním úhlem menším než 90° se kvalita pokrytí lepeného povrchu odvíjí od času kontaktu lepidla s povrchem. Proto je při konstruování lepeného spoje zapotřebí působit na spoj vnější silou po dostatečně dlouhou dobu. [2]



Obr. 1.5: Vliv doby zalisování na pevnost spoje [2]

1.3. Polarita

Polarita lepeného povrchu významně souvisí se smáčivostí a adhezním napětím lepidla a povrchu. Molekuly lepidel jsou jednostranně elektricky orientovány, jinak řečeno, jsou polární. Mezi polárními povrchy dochází k vyvolání disperzních sil, které lze připodobnit k silám přitažlivě magnetickým. Jako polární povrchy můžeme uvést např. většinu přírodních polymerů, povrchově oxidované kovy, sklo atp. Nepochárné povrchy jsou mnohé plasty, syntetické textilie a vosk. [2]

Příklady polárních a nepolárních látek: [1]

Polární látky	Povrchové napětí
Celulóza	>70 mNm
železo	cca 60 mNm
PVC	40 - 45

Příklady povrchového napětí některých látek: [1]

Polární látky	Povrchové napětí
Voda	73 mNm
Ethanol	23 mNm
Toluen	28 mNm

Nepochárné plasty za normálních podmínek lepit nelze, proto je nutné povrch zpolarizovat tak, aby na něm mohly vznikat chemické reakce. Nejčastějším způsobem polarizační úpravy je oxidace. Pro oxidaci se nejčastěji používá proces tzv. koronizace elektrickým jiskrovým výbojem. Dalším používaným způsobem je působení silných oxidačních činidel na lepený povrch (např. peroxid vodíku s kyselinou sírovou) [1]

1.4. Koheze

Kohezi můžeme chápat jako vnitřní soudržnost lepidla. Velikost koheze se dá popsat tzv. kohezní energií. Tato energie vyjadřuje maximální vnitřní pevnost lepidla, než dojde k přerušení vazeb jednotlivých částic lepidla od sebe. Adhezní a kohezní síly by měly být v rovnováze, protože každý řetězec je jen tak pevný, jak je pevný jeho nejslabší článek. V případě, že se lepený spoj roztrhne v úrovni vrstvy lepidla, značí to, že adheze i pevnosti lepeného materiálu je vyšší než koheze. [3]

2. Vlastnosti lepidel

2.1. Složení a tvar makromolekuly

Složení lepidel tvoří syntetické nebo přírodní filmotvorné makromolekulární látky. Konečný tvar makromolekuly udává rozpustnost lepidla a tepelnou odolnost. Velikost adheze je dána složením makromolekul. Filmotvorné látky mohou mít lineární nebo trojrozměrnou strukturu makromolekuly. [4]

2.2. Polymerace

Polymerační stupeň udává délka molekul filmotvorného polymeru. Velikost makromolekul ovlivňuje kohezi, adhezi a viskozitu filmu lepidla. Dlouhé makromolekuly vykazují lepší viskozitu a kohezi, ale nižší adhezi. U krátkých makromolekul je to přesně opačně. K zajištění bezvadné funkce lepidla je nutné dodržet vysokou adhezi i kohezi. Proto lepidla zpravidla obsahují vysoko i nízkomolekulární látky. Pro výrobu lepidel jsou nejvhodnější polymery s polymeračním stupněm v rozsahu od 50 do 300. [4]

2.3. Viskozita

Viskozitou lepidel se zabývá norma ČSN 673013. Viskozita vyjadřuje vnitřní tření v lepidle. Stupeň viskozity je ovlivňován polymeračním stupněm filmotvorné látky, obsahem a kvalitou plniva, poměrem ředidla k rozpouštědлу a teplotou. Lepidla s vyšší viskozitou se hůře nanášejí a roztírají po lepeném povrchu. V extrémních případech hrozí nedokonalé pokrytí povrchu adherentu. Viskozita lepidel se může měnit důsledkem stárnutí lepidla nebo nesprávným skladováním. Pokud by tomuto znehodnocení lepidla došlo, lze ho pomocí vhodných plniv nebo jiných lepidel ředit, či zahušťovat. [4]

2.4. Kyselost a zásaditost

Stárnutím filmu lepidla se z něj uvolňují kyselé těkavé látky, které mohou negativně ovlivňovat pevnost lepeného spoje (např. u močovinoformaldehydových lepidel). Za účelem snížení účinku těchto těkavých látek se používají chemicky účinná plniva. Silně zásaditá nebo kyselá lepidla mohou být nebezpečná pro lidský organismus, proto je nutné dodržovat zásady bezpečnosti práce a dbát na čistotu zařízení. [4]

2.5. Homogenita

Homogenita je stěžejní vlastnost lepicích směsí pro správné plnění jejich funkce. To se vztahuje především na vícesložkové lepidla a lepidla s obsahem plniv. K vícesložkovým lepidlům výrobce přikládá přesný popis přidávání komponentů, který je pro správnou kompletaci spoje nutné dodržet. Lepidlo a plniva jsou uchovávána odděleně a před aplikací je důležité složky dokonale promíchat. [4]

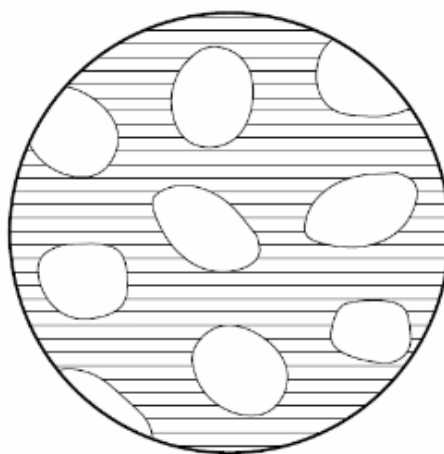
2.6. Objemové změny filmu lepidla

Dopadem procesu vytvrzování prochází film lepidla objemovými změnami. Tyto změny jsou ovlivněny obsahem aktivních složek a plniv v lepidle. Nízké zastoupení aktivních látek v lepidle způsobuje větší objemové změny. Aktivní složky mají za úkol zesílení struktury a může se jednat o polymery, monomery případně sloučeniny. Objemově nejstálější jsou tavná a bezrozpouštědlová reaktivní lepidla. Naopak největší objemové ztráty vykazují lepidla rozpouštědlová a disperzní. [4]

2.7. Složení a struktura plniva

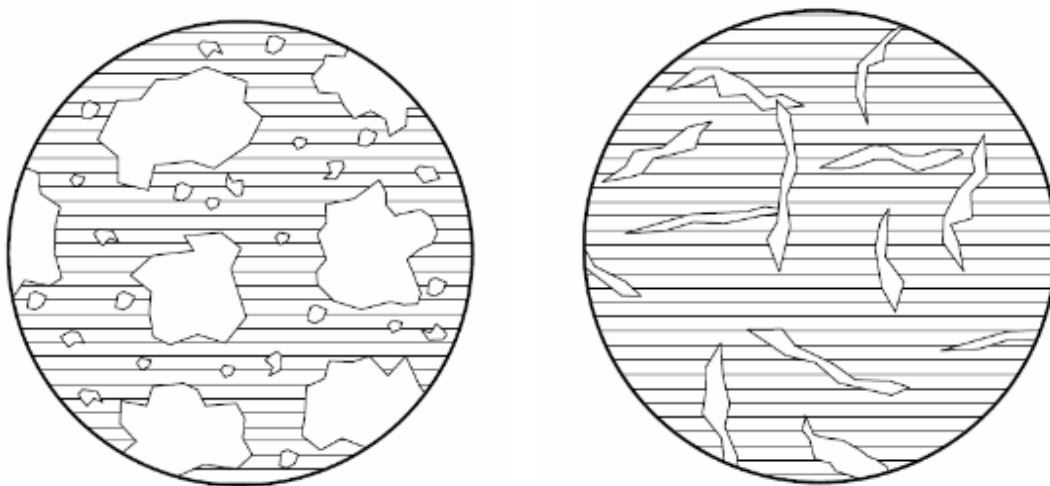
Plniva v lepidlech zastávají velmi důležitou složku. Dělí se na organická a anorganická. [4]

Organická plniva jsou měkká a jsou šetrná k břitům nástroje při obrábění spoje. Mezi největší nevýhody organických plniv se řadí jejich nepříznivý vliv na objemovou stálost a vodovzdornost filmu lepidla. Organická plniva se dělí na plniva s oblými částicemi (obr. 2.1), která dobře šíří vnitřní pnutí (škrob, žitná technická mouka), nebo plniva s vláknitou strukturou, která mají dobrý zahušťovací účinek. [4]



Obr. 2.1: Plnivo s částicemi s oblými hranami [10]

Anorganická plniva mohou obsahovat destičkové, vláknité a ostrohranné částice (obr. 2.2). Destičková struktura plniva (slída, kaolin) negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti spoje. Lepidla s vláknitou strukturou (skelná sekaná vlákna, azbest) mají zvýšenou viskozitu lepidla. Ostrohranná plniva (kovy, vápenec, porcelán) zvyšují elektrickou a tepelnou vodivost filmu. [4]



Obr. 2.2: Plniva s ostrohrannými částicemi [4]

3. Lepidla a jejich rozdělení

Norma ČSN EN 923 definuje lepidla jako „nekovovou látku schopnou spojovat materiály slepením povrchů (adhezí) s tím, že lepený spoj disponuje potřebnou vnitřní pevností (kohezí)“.
[5]

Rozdělení lepidel je nelehkou záležitostí. Lepidla lze totiž klasifikovat rozdělit podle velkého množství kritérií, ať už z pohledu technologického nebo chemického. Následující rozdělení je psané zjednodušeně bez detailního zaměření na chemickou podstatu, ale vysvětluje základní principy klasifikace a rozdíly dílčích kategorií lepidel. [2]

3.1. Dle chemické struktury

Dle chemické struktury lze lepidla dělit na:

- lepidla na anorganické bázi,
- lepidla na bázi silikonů,
- lepidla na organické bázi [2]

3.1.1. Lepidla na anorganické bázi

Mezi lepidla na anorganické bázi se řadí cementy, malty, rozpustné silikáty, například vodní sklo apod. Do této kategorie dále spadají i taveniny na bázi anorganických kysličníků a silikátů sloužících pro svařování skla. [2]

3.1.2. Lepidla na bázi silikonů

Jedná se o polymerní látky s centrálním atomem na bázi křemíku, které tvoří jistý přechod mezi anorganickými a organickými sloučeninami. Polymerní řetězec se většinou skládá z atomů křemíku, téměř vždy obsahuje substituenty nebo koncové skupiny organického charakteru. Mohou také obsahovat reaktivní skupiny, které mají za následek prodloužení polymerního řetězce nebo vytvoření prostorové struktury polymeru. Za silikonů můžeme považovat také tzv. MS polymery, jejichž polymer na organické bázi je upravován křemíkem.
[2]

3.1.3. Lepidla na organické bázi

Jsou to polymerní látky s centrálním atomem na bázi uhlíku. Dále se dělí na lepidla:

- přírodní
- semisyntetická
- syntetická [2]

Přírodní lepidla jsou tvořena látkami rostlinného nebo živočišného původu. Řadíme mezi ně například moučný škrob, klovatinu z rostlinných pryskyřičných výpotků (např. arabská guma, denárová pryskyřice apod.), latex z přírodního kaučuku nebo kliš z kostí nebo kůže zvířat. [2]

Přírodní materiál může být za účelem lepení různě modifikován. Přírodní latex je náchylný na rozpad ochranné koloidní vrstvy, proto se nechává stabilizovat většinou pomocí čpavku a pro lepení se latex používá koncentrovaný. Dalším příkladem je arabská guma, která se pro lepení používá v kapalně formě s přídavkem polyalkoholu, nejčastěji glycerinu. [2]

Semisyntetická lepidla využívají polymerního řetězce získaného z přírodního materiálu. Pro získání požadovaných vlastností spoje je tento řetězec chemicky modifikován. Nejčastěji je to řetězec na bázi celulózy. Mezi semisyntetické látky můžeme zařadit i chemicky modifikovaný přírodní kaučuk (tzn. cyklokaučuk, chlorkaučuk nebo hydrochlorkaučuk) nebo chemicky upravený škrob (např. karboxymetylškrob nebo kasein). [2]

Syntetická lepidla zajišťují spoj polymerem získaným chemickou reakcí z monomolekulárních (nízkomolekulárních) látek. Polymery se vytváří pomocí polymeračních, polykondenzačních nebo polyadičních reakcí. Těmito chemickými reakcemi můžeme dosáhnout struktury lineárních polymerních řetězců, tvořených jedním typem monomerních jednotek, zvané homopolymery. Homopolymer ale často není schopen zajistit požadované vlastnosti polymerního materiálu. Proto se v technické praxi využívají polymery tvořené z více typů monomerních jednotek. Může se jednat o kopolymery, kdy je polymer tvořen dvěma typy polymerních jednotek nebo terpolymery, které mají strukturu tvořenou třemi nebo více polymerními jednotkami. [2]

3.2. Dle druhu vytvrzovací reakce

Lepidla můžeme rovněž rozdělit podle tří typů vytvrzovací reakce:

- polykondenzační reakce,
- polymerační reakce,
- polyadiční reakce. [6]

3.2.1. Polykondenzační reakce

Polykondenzace spočívá ve slučování většího počtu molekul stupňovitým mechanismem v makromolekuly, dochází k odštěpování jednoduchých molekul, např. vody, alkoholu apod. Produkt polykondenzace má jiné elementární složení než výchozí monomery. [6]

3.2.2. Polymerační reakce

Polymerace je reakce, při které se molekuly monomeru spojují řetězovým mechanismem v makromolekuly polymeru, bez toho, aby se odštěpovala voda nebo jiné jednoduché látky. Produkt má nejčastěji stejné elementární složení jako monomer. [6]

3.2.3. Polyadiční reakce

Polyadice je velmi podobná polykondenzační reakci, protože také probíhá stupňovitým mechanismem. Rozdíl tkví v tom, že při polyadici nedochází k odštěpování nízkomolekulární látky. Elementární složení polymeru je stejné jako složení monomeru. [6]

3.3. Dle fyzikální podstaty

Dle fyzikální podstaty lze lepidla dělit na:

- kapalná lepidla,
- plastická lepidla,
- tuhá lepidla. [2]

3.3.1. Kapalná lepidla

Do této skupiny se řadí:

- reaktivní monomery
- reaktivní prepolymery
- roztoková lepidla
- disperzní lepidla [2]

3.3.2. Plastická lepidla

Plastická lepidla tvoří určitý přechod mezi kapalnou a tuhou látkou. Patří sem:

- tmely
- kaučukové patche,
- některé typy cementů,
- pasty apod. [2]

3.3.3. Tuhá lepidla

Jedná se o látky v tuhém stavu, které jsou převedeny do plastického stavu přímým ohřátím, dále pomocí vysoké frekvence nebo jiným způsobem, ve kterém jsou schopné adheze. Jsou to velmi trvanlivá lepidla, která odolají extrémním teplotám, chladu, vlhkosti, velkému množství rozpouštědel a dalším náročným podmínkám. Jedná se o:

- termolepidla,
- lepicí fólie. [2]

3.4. Dle počtu složek

Lepidla můžeme rovněž rozdělit podle počtu složek:

- jednosložková lepidla,
- vícesložková lepidla. [2]

3.4.1. Jednosložková lepidla

Tradičními jednosložkovými epoxidy jsou tvrdá lepidla, která se musí mnohokrát vysokoteplotně vytvrzovat a dochází tím k vynikající pevnosti při zvýšených teplotách. Díky inovacím v jednosložkových epoxidových lepidlech dnes existují rovněž lepidla, která jsou schopná vytvrzení i při nižších teplotách. Je tak zajištěna lepší flexibilita a rázuvzdornost. Tato inovativní složení jsou lepší pro lepení řady plastů, což vede k aplikacím v oblasti spotřební elektroniky, dále se využívají ve vojenském prostředí a leteckém průmyslu. [2]

3.4.2. Vícesložková lepidla

Vícesložková lepidla jsou směsí dvou nebo více složek, které se smíchávají bezprostředně před kompletováním spoje. Je tomu tak, protože ve většině případů dochází k chemické reakci okamžitě po smíchání složek a lepidlo má jen omezenou dobu zpracovatelnosti, kde se dá vytvořit pevný spoj. Může se zdát, že z technologického hlediska bude vhodnější co nejdelší doba zpracovatelnosti. Jenže s delší dobou zpracovatelnosti se prodlužuje i interval, kdy spoj mezi dvěma adherendy dosáhne potřebné pevnosti. V praxi tedy musíme zvolit jistou rovnováhu mezi dobou zpracovatelnosti a dobou, kdy bude od lepeného spoje vyžadována určitá pevnost. Proto je vhodné připravit pouze takové množství směsi, které bude možné zpracovat v průběhu doby zpracovatelnosti. [2]

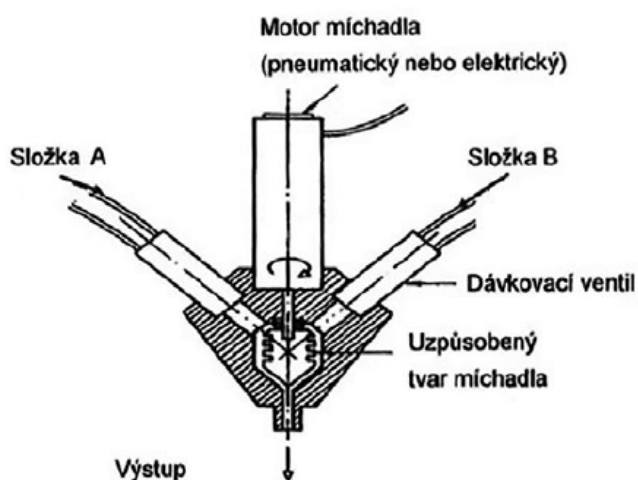
Vytvrzování většiny dvousložkových lepidel lze zkrátit účinkem teploty. Lze tak zpracovávat i směsi s poměrně dlouhou dobou zpracovatelnosti. Pro zrychlení vytvrzení můžeme nanést lepicí směs na přehřáté adhirendy nebo vytvořený lepený spoj vystavit zvýšené teplotě. U speciálních dvousložkových systémů je možné urychlit vytvrzování lepeného spoje účinkem UV nebo světelného záření. [2]

Pro zpracování dvousložkových směsí s dobou zpracovatelnosti kratší, než pět minut je nutné použít směšovače. Pro běžné lepení jsou dvousložková lepidla dodávána v kartuších, kde jsou složky od sebe odděleny. K promísení dojde vytlačováním složek přes mechanický směšovač, viz obr 3.1. [2]



Obr. 3.1: Princip směšovače, průběh směšování dvoukomponentních lepidel [2]

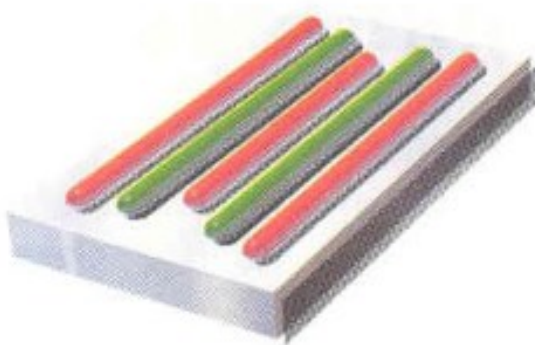
V průmyslu, kde se využívá kontinuální výroby vícesložkových lepených spojů se používá dynamický směšovač, který je schematicky vyobrazen na obr. 3.2. Směšovač umožňuje práci s lepicími směsmi s kratší dobou zpracovatelnosti než je jedna minuta. [2]



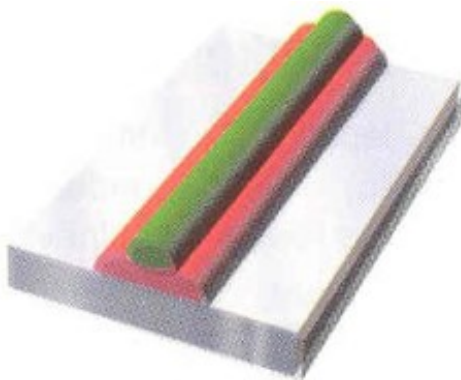
Obr. 3.2: Dynamický směšovač pro dvoukomponentní lepidla [2]

V praxi se také využívá technologie, ve které se nanáší složky lepidel odděleně na jednotlivé plochy adherentů. Respektive jedna složka se nanese na plochu prvního adherentu a druhá složka na plochu druhého adherentu. Následně se k sobě plochy přitlačí, složky se mezi sebou promísí a dojde k vytvoření poměrně rychlého a pevného lepeného spoje. Tato technologie se využívá zejména u dvousložkových lepidel na bázi reaktivních akrylátů. Podmínkou pro použití je, že lepicí vrstva složek bude mít malou tloušťku. [2]

Pro tvorbu lepených spojů s větší tloušťkou byla vyvinuta lepidla s konzistencí složek připomínající plastelínu. Lepidlo se nanáší na plochy adherentu způsobem pruh vedle pruhu nebo pruh na pruh, viz obr. 3.3 a 3.4. Složky se promísí po přitlačení na plochu druhého adherentu. Pro zlepšení spojení složek se v některých případech doporučuje lepenými součástmi mírně pohybovat. [2]



Obr. 3.3: Nanášení lepidla pruh vedle pruhu [2]



Obr. 3.4: Nanášení lepidla pruh na pruh [2]

3.5. Lepidla v automobilovém průmyslu

Lepidla využívaná v automobilovém průmyslu musí splňovat následující kvality a bezpečnostní předpoklady:

- odolnost vůči nízkým teplotám (od -50 °C) a vysokým teplotám (až do 80 °C),
- odolnosti vůči provozním kapalinám, povětrnostním vlivům a roztokům soli,
- schopnost lepit rozdílné typy materiálů,
- dostatečná viskozita pro požadavky vysoké produktivity pásové výroby,
- náklady lepení nesmí převyšovat konvenční způsoby spojování,
- požadavky v rámci bezpečnostních předpisů kompletace lepených spojů,
- odolnost vůči mazivům a musí prokázat dostatečnou adhezi a pevnost i přes výskyt povrchové vrstvy nečistot. [7]

Příklady využití druhů lepidel v automobilovém průmyslu jsou uvedeny v tabulce 3.1

Tab. 3.1: Využití lepidel při konstrukci automobilu [7]

Druh lepeného spoje	Příklady použití	Lepidla	Vlastnosti lepeného spoje
Drážkové přírubové lepení	kapota	epoxidová pryskyřice	pevnost, tuhost, chování při nárazu, ochrana před štěrbinovou korozí
Výztuhové lepení	dveře, kapota	polyuretany, PVC, syntetické kaučuky	neohebnost torze, vzhledový díl nesmí být deformovaný
Lepení nosné struktury	sloupky, profily, přírubové švy	epoxidová pryskyřice	pevnost, tuhost, chování při nárazu
Přímé zasklívání	přední, zadní a pevné boční tabule	polyuretany	tuhost karoserie, těsnost, nepropustnost
Těsné lepení	hrdlo nádrže, utěsnění švu	PVC, syntetické kaučuky	těsnost, odolnost vůči korozi

3.5.1. Epoxidová lepidla

Epoxidová lepidla jsou v současnosti považována za velmi perspektivní. V dnešní době modifikovaná epoxidová lepidla jsou schopná odolávat velmi vysokým provozním teplotám (až ± 150 °C). Vyrábí se mnoho druhů epoxidových pryskyřic s velmi odlišnými vlastnostmi a s tím také roste množství možností použití. Mohou být dvousložková nebo jednosložková. Pro vytvrzování při laboratorní teplotě se využívají především lepidla dvousložková. Nevýhodou lepidel pro práci ve vysokých teplotách je, že požadují také vyšší vytvrzovací teploty a jsou relativně křehká. [4] [8]

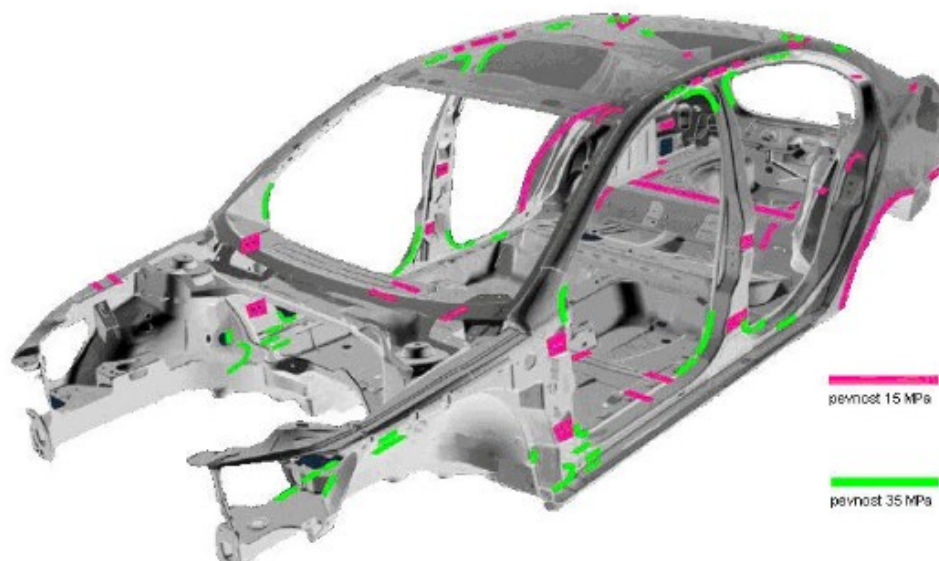
V praxi se využívají v podobě práškových hmot slisovaných do housenkovitých tvarů, nebo to mohou být viskózní kapaliny, fólie s nosičem i bez nosiče anebo pasty. Epoxidové pryskyřice se dá velmi dobře modifikovat, protože se snáší s mnoha jinými pryskyřicemi. Díky tomu mohou vykazovat příznivou pevnost při různých tloušťkách vrstvy lepidla. [4] [8]

Modifikací epoxidových lepidel můžeme ovlivňovat mnoho vlastností, ať už je to zvyšování pevnosti, tepelné odolnosti a odolnosti vůči vlivům prostředí. Vytváří se tak kvalitní konstrukční lepidla s využitím téměř ve všech průmyslových odvětvích.

Mezi jejich výhody se řadí:

- k vytvrzení nepotřebují téměř žádné zatížení tlakem. Doporučuje s pouze tlak 0,3 MPa, který má zajisti slícování lepených ploch a zamezit proti proklouznutí,
- neuvolňují se žádné zplodiny při vytvrzování,
- mají malou objemovou smrštivost (od 0,05 do 5 %),
- vykazují dobrou adhezi k mnoha materiálům,
- mají velmi dobrou kohezní pevnost, která je často vyšší než pevnost samotného adherentu,
- epoxid-fenolická lepidla mají vysokou odolnost vůči vysokým teplotám. [8]

Epoxidová lepidla se v autoprůmyslu uplatňují při lepení částí karoserie. Obr. 3.6 znázorňuje místa, kde se epoxidových lepidel využívá a jsou barevně odlišena podle pevnosti.



Obr. 3.5: Místa použití epoxidových lepidel na karoserii Škoda Octavia 2 [8]

3.5.2. Kaučuková lepidla

Kaučuková lepidla můžeme rozdělit na:

- vulkanizační,
- nevulkanizační,
- samovulkanizační,
- vulkanizační za zvýšené teploty. [8]

Nevulkanizační lepidla jsou jednosložková a většinou i jednoúčelová. Pevný spoj vznikne až po odpaření rozpouštědel. Optimální pevnost spoje dosáhnou nevulkanizační lepidla až teprve několika hodinách či dnech. [8] [9]

Vulkanizace zvyšuje pevnosti spojů kaučukových lepidel. Vulkanizační kaučuková lepidla vykazují značně vyšší pevnost než nevulkanizační. Vulkanizační kaučuková lepidla využívají vulkanizačních přísad a vulkanizují obvykle okolo teploty 145 °C. [8] [9]

Samovulkanizační kaučuková lepidla využívají nejen vulkanizačních přísad, ale jsou do nich přidávány také aktivátory a urychlovače, které mají za následek, že vulkanizace může proběhnout i za mnohem nižších teplot (přibližně 25 až 30 °C). [8] [9]

Rozpouštědlo pro výrobu kaučukového lepidla musí splňovat následující požadavky:

- musí být nízkotoxické
- nesmí zapáchat
- nesmí negativně ovlivňovat kvalitu lepidla
- musí dodržet přijatelnou rychlost rozpouštění kaučuku a odpařování
- musí zaručit nízké riziko vzniku ohně [8]

Přírodní kaučuk se využívá na tvorbu textilních nebo polypropylenových lepících pásek. Lepidlo se nanáší ve formě roztoku potíráním, nebo nanášením tuhé směsi za zvýšené teploty. Dalším využitím přírodního kaučuku jsou tmely v podobě vysoko-viskózních kapalin nebo past vhodných pro vytlačování. Tato lepidla vysychají odpařováním rozpouštědel či vody. Rovněž vulkanizují po zahřátí nebo po přidání katalyzátoru. Lepidla z přírodního kaučuku a z regenerátu mají výbornou lepidlost. Mezi výhody lepidel z regenerátoru patří vyšší odolnost proti povětrnostním vlivům, menší náchylnost ke creepu za tepla, nízká cena, snadné nanášení, dlouhá doba zpracovatelnosti, mají vysokou stabilitu v roztoku a ze všech kaučukových lepidel se nejlépe nanášejí stříkáním. Jsou vhodná k lepení papíru, kovů, plastů, kůže, pryže i dřeva a automobilovém průmyslu mají značné využití. [8] [9]

4. Lepení v automobilovém průmyslu

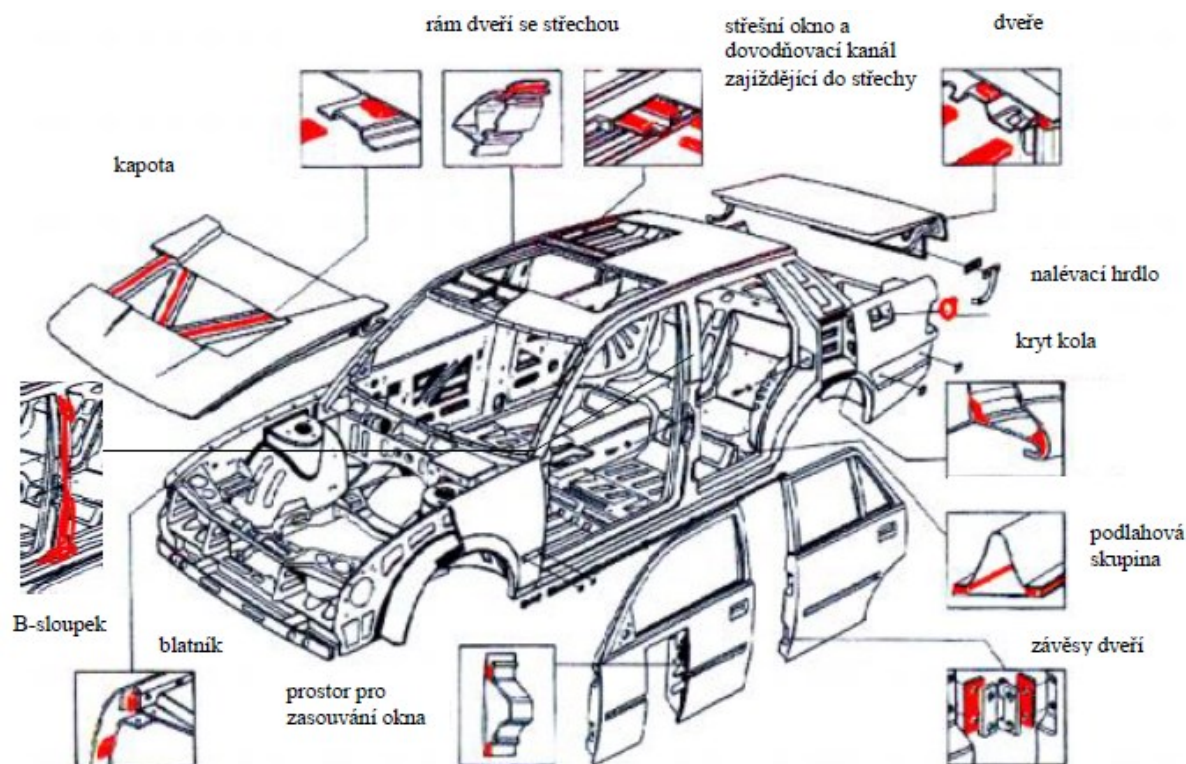
Moderní automobil je tvořen širokým spektrem materiálů a s tím rostou požadavky na spojování často velmi odlišných typů materiálů. Jednou z dominantních vlastností technologie lepení je právě schopnost vytvořit spoj materiálů, které by nebyly možné spojit jakýmkoliv jiným konvenčním způsobem. I proto v současné době můžeme pozorovat velký rozvoj tohoto odvětví. Uvádí se, že podíl lepených spojů běžného automobilu každý rok vzrůstá o tři procenta a s vývojem nových typů lepidel můžeme očekávat, že tento podíl se bude i nadále zvyšovat. Lepení v automobilovém průmyslu zastává především funkci doplňkovou a těsnící. Ale ve specifických případech dokáže nahradit svarové spoje v konstrukčních pevnostních spojih. [9] [10]

Lepené spoje při konstrukci automobilu lze rozdělit do následujících skupin:

- lepení frikčních materiálů
- konstrukční lepené spoje karoserie
- tmelení karoserie
- lepení lepidly obsahující rozpouštědla
- lepení okenních skel
- lepení tavnými lepidly
- lepení samolepícími páskami [10]

4.1. Lepení karoserie

Mnohé klasické metody spojování karoserie v dnešní době z důvodu velkých požadavků na komfort a bezpečnost posádky jsou již nevyhovující. Nehledě na odolnosti proti porušení při tzv. crash-testu musí lepený spoj musí prokazovat své vlastnosti i při namáhání vnějšími jevy, jako je zvýšená provozní teplota či vlhkost vzduchu prostředí. Lepené spoje mají velmi příznivý poměr váhy k pevnosti, a to má za následek snižování hmotnosti vozu. Ušetření celkové hmotnosti automobilu přináší značná ekologická i ekonomická zvýhodnění. Technologie je také využívána k těsnění svarových spojů a tím zabránění vzniku koroze. V neposlední řadě mají lepené spoje velmi malou prostupnost zvuku, takže díky tomu zvyšují komfort posádky při provozu. Nejčastější příklady využití technologie lepení karoserie znázorňuje obr. 4.1. [8] [9]



Obr. 4.1: Lepené spoje na karoserii osobního vozu [7]

4.2. Kombinování lepení s ostatními způsoby spojování

Konstrukci lepeného spoje značně komplikuje nevýhoda reaktivních (chemicky vytvrzovaných) lepidel. Tato nízko-viskózní lepidla v okamžiku nanášení nemají takřka žádnou pevnost a potřebují určitý čas na vytvrzení. V leteckém průmyslu je často využíváno pomocných lepicích fólií. Pro automobilový průmysl nepřipadají v úvahu z důvodu členitosti a mnohotvárnosti dílů karoserie. Proto se v praxi využívá tzv. hybridního lepení, které spočívá v kombinaci strukturního lepení s ostatními konvenčními způsoby spojování. Typickým příkladem kombinace druhů spojení na automobilu je bodové svařování s podporou strukturního lepení, lepí se tak např. podběhy a nosné části karoserie. Lepení se kombinuje s bodovým svařováním v případě, že samostatné spojení bodovým svařováním není dostačující pro požadavky crash-testu automobilu. Hybridní lepení vykazuje vlastnosti, kterých by jednotlivé způsoby spojení samostatně nedosáhly. Velkými přednostmi jsou multifunkčnost a vysoká účinnost spojení. Tabulka 4.1 ukazuje možnosti různých způsobů spojování pro hybridní lepení. Spojení, jako je obloukové svařování, je pro tuto techniku nevhodné z důvodu působení vysokých teplot na velkou plochu spoje a hrozila by degradace lepidla. Rozrušení lepidla lze připustit pouze v bezprostředním okolí svarových bodů. Dodržují se dostatečné rozestupy, aby lepidlo zůstalo z velké většiny nepoškozené. [8] [10]

Tab. 4.1: Možnost kombinování různých spojení s technikou lepení [8]

Způsob spojování	Možnost kombinování s technikou lepení
Bodové svařování	ano
Svařování MIG, MAG, WIG	ne
Svařování nosníků	ano
Svařování laserem (linie)	ne
Svařování laserem (stehování)	ano
Drážkování	ano
Clinchování (spojování prosazováním)	ano
Nýťování naslepo	ano
Samostatné nýťování lisováním	ano
šroubové spojení	ano

4.4. Přednosti a nedostatky lepených spojů

Vlastnosti, které lepené spoje poskytují jsou pro automobilový průmysl velmi přínosné, a jak už bylo zmíněno stávají se nedílnou součástí stavby automobilu. Ovšem stejně jako každá technologie spojování, i lepení má své přednosti a nedostatky. [10]

Výhody lepeného spoje:

- Spojovat lze stejné i strukturně velmi odlišné materiály
- Poskytuje odolnost vůči galvanické korozi
- Tlumí vibrace a má protihlukové účinky
- Těsný spoj zajišťuje vodotěsnost i plynotěsnost
- Rovnoměrně rozkládá napětí na lepenou plochu
- Snižuje hmotnost vozu
- Snižuje výrobní náklady
- Umožňuje spojení velkých ploch
- Poměrně nenáročná aplikace [10]

Nevýhody lepeného spoje:

- Jedná se o nerozebíratelný spoj
- Náchylnost na zvýšenou okolní teplotu
- Omezená živostnost spoje
- Nižší pevnost v odlupu a stříhu
- Maximální pevnost spoje je dosažena až po řádném vytvrzení
- Vytvrzení bývá časově náročné
- Před lepením je nutné stykové plochy důkladně očistit
- Spoje nejsou vhodné pro konstrukce proměnlivě zatěžované [10]

Tabulka 4.2 poskytuje srovnání nejčastěji používaných druhů spojování se strukturním lepením. Tabulka zahrnuje stěžejní vlastnosti včetně výrobního procesu. V porovnání s ostatními způsoby spojení, strukturní lepení vykazuje lepší výsledky ve všech hodnotících kritériích s výjimkou okamžité pevnosti. To je také častým důvodem využití kombinace s jinou technologií spojování. [10]

Tab. 4.2: Technologie spojování a jejich vlastnosti.

Vysvětlivky: +++ výborné, ++ velmi dobré, + dobré, o střední, - špatné [17]

	Vyztužení karosérie	Pevnost v rázu	Provozní odolnost	Odolnost vůči korozi	Rychlost výroby	Okamžitá pevnost
Strukturní lepení	+++	+++	+++	++	+++	-
Bodové svařování	o	o	o	-	-	+++
Svařování obloukem	++	++	++	-	-	+++
Svařování laserem	++	++	++	o	o	+++
Clinchování (roztepávání)	o	-	+	o	-	+++
Nýtování	o	-	+	-	-	+++
Šroubování	o	o	o	-	-	+++
Stehování laserem	o	o	o	-	++	+++

5. Technologie lepení

Lepený spoj je náročnou a komplikovanou operací, při které je nutné zohlednit mnoho faktorů. Existují dvě hlediska, ze kterých konstruktér může vycházet při navrhování lepeného spoje.

- a) Pro danou konstrukci a její požadavky navrhuje vhodný druh spoje a vyhovující lepidlo.
- b) Pro daný typ lepidla hledá vhodnou aplikaci.

Konstrukce lepených spojů jsou limitovány následujícími hledisky:

- fyzikálně-mechanickými vlastnostmi použitého lepidla
- fyzikálně-mechanickými vlastnostmi lepených materiálů
- charakterem a velikostí adhezivních sil na rozhraní lepidla a substrátu
- geometrií spojů
- použitím jiných spojovacích technologií v konstrukci

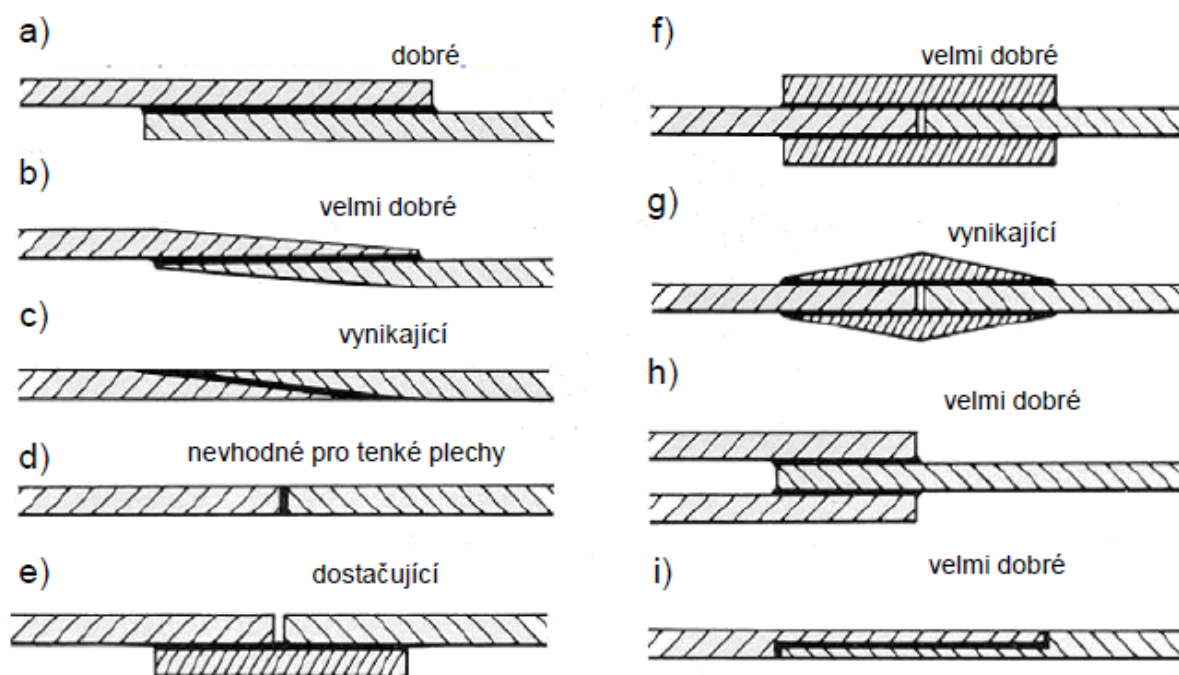
Na základě těchto limitujících podmínek je možné zkonstruovat tabulku pro volbu lepidla (Tab. 5.1). [3]

Tab. 5.1: Omezující faktory pro volbu lepidla [3]

Působící síla	Velikost sil	Síly převyšující pevnost zákl. materiálu Síly nepřevyšující pevnost zákl. materiálu
	Orientace sil	Charakter namáhání (tah, tlak, smyk apod.)
	Časový průběh sil	Statické zatěžování Dynamické zatěžování Kombinované zatěžování
	Čas zatěžování pod R_m	Krátkodobé zatížení Dlouhodobé zatížení
Vlastnosti a vazby adherendu a adheziva	Moduly pružnosti	
	Typ vazby	Chemická vazba Mechanická vazba Fyzikálně-chemická vazba Kombinovaná vazba
	Polarita spoje	Polární+polární Polární+nepolární Nepolární+nepolární
	Typ povrchu adherendu	Hladký, nebo pórovitý povrch, korozivzdorné, nebo korodující apod.
	Pevnost adherendu	Křehké nebo houževnaté materiály apod.
	Tloušťka lepidla	Tenké filmy, silné filmy, lepidla vyžadující tlak, dotyková lepidla ad.
Příprava lepeného spoje	Lepený materiál	Běžně lepitelné, obtížně lepitelné, lepitelné se zvl. přípravou povrchu.
	Použité lepidlo	Viz kap. 4
	Bezpečnostní předpisy	Dle třídy hořlavosti, BOZP, životního prostředí apod.
Geometrie spoje	Počet spojů	N spojů od každého lepidla
	Rozměry spoje	Řádově odlišné tloušťky lepených materiálů
	Vzájemná poloha a působíště spojů	Překrývající se spoje Spoje na tupo Šikmé spoje Úhlové spoje Spoje trubek, tyčí a profilů ad.
	Kombinace spojení	Geometrické kombinace spojů Kombinace s ostat. způsoby mechanického spojování Kombinace se svařováním a pájením
Ostatní znaky konstrukce	Vliv prostředí	Normální podmínky Zhoršené podmínky (zimní a letní) Extrémní podmínky (fyzikální a chemické) Kombinované podmínky
	Spolehlivost spoje	Porušení nemá významný vliv na funkci Porušení může vést k havárii
	Nároky na životnost	Krátkodobá životnost spoje Dlouhodobá životnost spoje Jednorázová funkce

5.1. Základní typy lepeného spoje

Ve strojírenství se využívají především základní spoje, které jsou zobrazeny na obr. 5.1. Lepený spoj lze vytvořit i jiným způsobem, ale vždy se jedná pouze o kombinace těchto základních spojů. Rozhodujícím faktorem při výběru druhu spoje je způsob, jakým je spoj zatěžován, zda je zatěžován na odlup, nebo na smyk. Dále je nutné zohlednit, zdali je spoj namáhán statickým, nebo dynamickým zatížením. Nejpoužívanějším spojem v praxi je jednoduchý spoj překlátováním. [3]







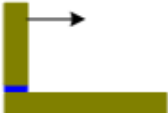
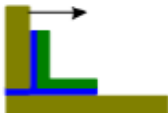
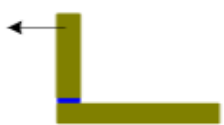





Obr. 5.1: Základní typy lepeného spoje

a) Jednoduchý překlátovaný spoj, b) Zúžený překlátovaný spoj, c) Seříznutý spoj, d) Tupý čelní spoj, e) Překlátovaný spoj spojený pásem, f) Dvojitě překlátovaný spoj spojený pásem, g) Dvojitě překlátovaný spoj se zúženými pásy, h) Dvojitě přeložený spoj, i) Stupňovitě přeložený spoj [3]

5.2. Pravidla konstrukce lepených spojů

Automobilový průmysl si dnes bez lepených konstrukčních spojů jen těžko dokážeme představit, a to jak z hlediska funkčního namáhání, tak i z hlediska konstrukčního provedení. Vhodně zvolená konstrukce spoje zajišťuje požadovanou pevnost a únosnost. Lepené spoje se zpravidla charakterizují svou vysokou pevností ve smyku. Naopak je to s pevností v tahu, která je značně nižší. Lepený spoj je nejpevnější, když napětí může být rozprostřeno po celé ploše spoje. Z toho plyne, že lepené spoje nejlépe snáší napětí tahové, tlakové a smykové. Slabinou lepených spojů je namáhání na odlup a rozštěp, proto se doporučuje použití kombinace lepicích technik spojování pro lepší rozložení sil viz obr. 5.2. [3] [11]

Návrh orientace spoje	
Nesprávně	Správně
	
	
	
	
	
	

Obr. 5.2: Příklady orientace lepeného spoje [19]

Orientace lepeného spoje se odvíjí od druhu použitého lepidla a jeho vlastností a také snahy vyhnout se namáhání v tahu a na odlup. V případě, že se tyto faktory jeví jako nevyhnutelné, ale je žádoucí zajistit řádnou spolehlivost spoje, využívají se jiné techniky spojování, nejčastěji jsou lepené spoje kombinované s bodovým svařováním, nebo nýtováním. [3]

Při navrhování lepených spojů se snažíme řídit následujícími základními požadavky.

- 1) Navrhnout spoj tak, aby byl namáhán ve směru největší pevnosti spoje. Zatížení orientovat převážně do smykového napětí a minimalizovat namáhání na odlup.
- 2) Dodržet geometrickou jednoduchost spoje bez složitých křivek.
- 3) Vyhnout se dvojímu lepení, tedy provést spoj současně ve všech místech.
- 4) Lepidlo musí mít vždy menší tuhost než lepené substráty. V opačném případě musí být lepené díly dostatečně vyztužené.
- 5) Úprava povrchu před lepení musí být provedena až po ostatních procesech v souvislosti s dodatečnými způsoby spojování (např. otvory pro nýty apod.)
- 6) Dodatečné technologie spojování provádíme až po vytvrzení lepidla.
- 7) Lepený povrch musí být před lepením náležitě upraven v rámci drsnosti, očištění a odmaštění.
- 8) Musí být zajištěna optimální tloušťka vrstvy lepidla (udává výrobce lepidel). [3]

5.3. Technologický postup lepení

Výrobu lepeného spoje můžeme rozdělit do čtyř jednotlivých fází. Jsou to příprava adherentu, příprava lepidla, nanášení lepidla a montáž spoje.

5.3.1. Příprava adherentu na lepení

Při konstrukci lepeného spoje je velmi důležité zajistit optimální smáčivost spojovaného materiálu lepidlem. Proto se povrch adherentu velmi často upravuje fyzikální, chemickou anebo speciální fyzikální cestou. Obvyklé nedokonalosti vyskytující se na povrchu lepeného materiálu, jako jsou nečistoty a koroze, negativně ovlivňují adhezi a z toho důvodu se před lepením povrchy upravují. Mezi fyzikální povrchové úpravy řadíme broušení, tryskání (viz obr. 5.3), obrábění, brokování, kartáčování, lapování, leštění apod. Speciálními fyzikálními operacemi jsou ozařování, čištění laserem, čištění ultrazvukem a polarizace plamenem. Mezi chemické úpravy patří odmašťování, moření, fosfátování, anodická oxidace, nanášení reaktivních základních nátěrů apod. Všechny uvedené metody upravují povrch

adherentu. S tím také souvisí kvalita lepeného spoje. Každá z uvedených metod ovlivňuje spoj jiným způsobem, a proto se rozlišuje, která úprava je vhodná pro specifickou kombinaci lepidla a základního materiálu. [3] [7] [11]



Obr. 5.3: Tryskání [18]

Odmašťování nabývá významu při lepení kovů, pokud se na povrchu vyskytuje nějaká chemická látka nebo sloučenina (prach, řezná kapalina, konzervanty nebo zbytky oleje). Obecně platí, že pro konstrukci lepeného spoje je důležité danou látku odstranit. V technické praxi se využívá odmašťovacích prostředků, které jsou charakteristické, tím že se po očištění povrchu zcela odpaří. Těmito odmašťovacími prostředky mohou být např. uhlovodíky, alkoholy, ketony nebo vodní emulze. V průmyslu se využívá speciálních odmašťovacích lázní. Jeden z příkladů je parní odmašťovací lázeň, kde se rozpouštědlo zahřívá na bod varu a odpařuje se. Pára se následně kondenzuje na součástech. V průmyslu se často využívá pouze tzv. „rychločističů“. Jedná se o jednorázové očištění včetně odstranění ostatních mechanických částic pomocí speciálního chemického prostředku.

Dalším využívaným způsobem je rozpouštědlové čištění v průmyslových odmašťovacích pračkách (viz obr. 5.4). Mimo klasickou funkci očištění pračka na povrch materiálu působí vířivými proudy rozpouštědla a mechanickým kartáčováním. Některé odmašťovací stroje používají recirkulaci vzduchu a na povrchu působí malé bublinky vzduchu, které odstraňují mastnoty a nečistoty z povrchu. Ovšem pouhé odmaštění a obnažení kovu však využívá potenciál lepidla jen asi z 50 až 60 %. [3] [7] [11]



Obr. 5.4: Průmyslový odmašťovací stroj [13]

5.3.2. Příprava lepidla

Způsob přípravy lepidla se odvíjí od čtyř základních faktorů: druh lepidla, chemická struktura, počet složek a doba životnosti. Životnost závisí na druhu lepidla, chemickém složení a podmínkách skladování. Při delší době, kdy je lepidlo uskladňováno, může dojít k nežádoucím reakcím. Například u těkavých látek hrozí zhoustnutí důsledkem tzv. vytěkání. Dalším jevem je sedimentace, kdy dochází k usazení rozpuštěné složky na dně balení lepidla. Ovšem dnešní lepidla se již vyrábí odolné proti sedimentaci a k tomuto jevu téměř nedochází. Největší výhodu mají při skladování lepidla dvousložková, protože jsou jejich složky od sebe odděleny a zmíněné nežádoucí jevy se jich netýkají a skladovat je teoreticky můžeme po neomezenou dobu. [3] [7] [11]

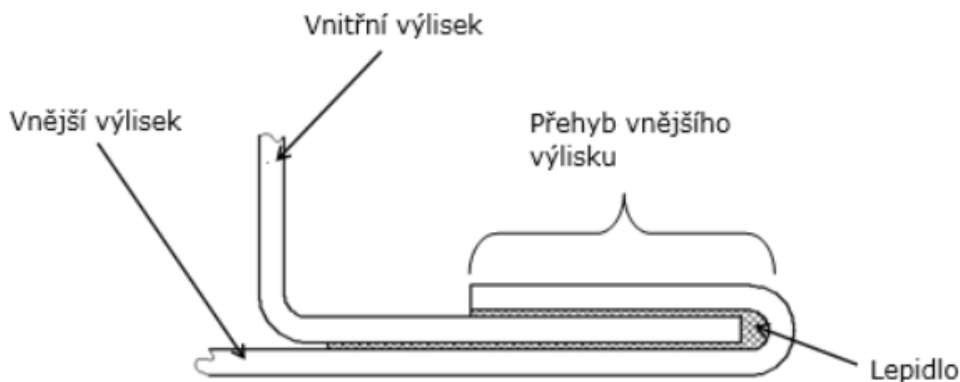
5.3.3. Nanášení lepidla

Způsob nanášení lepidla je určitou mezifází, která odděluje přípravu lepidla od vlastního vytvoření lepeného spoje. Účelem tohoto „meziprocesu“ je vytvořit souvislé a rovnoměrné vrstvy lepidla určité tloušťky. Lepidlo může být nanášeno na jednu nebo obě plochy adherentů. Konzistence lepidla, tvar a velikost lepených ploch, to jsou faktory, které ovlivňují způsob nanášení. V minulosti nanášení lepidel, především v kusové výrobě (nanášení štětcem,

válečkem apod.) vyžadovalo přípravné operace lepidel. Dnes se v průmyslové praxi k nanášení používají vytlačovací pistole. Pistole se liší pro jedno a dvoukomponentní lepidla. Dvoukomponentní lepidla využívají speciálních mísičů. Existují mísiče statické a dynamické. Je to levný způsob nanášení lepidla, ale nese s sebou nevýhodu v tom, že nelze zaručit přesné parametry nanášeného množství. To je hlavním důvodem proč v automobilním průmyslu, ale i v jiné sériové výrobě se využívá moderních dávkovacích a nanášecích systémů. Moderní systémy také dovedou pro danou operaci zvýšit teplotu lepidla a tím pozitivně změnit viskozitu. Díky tomu není zapotřebí žádným způsobem lepidlo připravovat. [3] [7] [11]

5.3.4. Montáž spoje

K vytvoření optimálního lepeného spoje musí být lepené díly při montáži zatíženy pod určitým předepsaným tlakem. Adherenty s nanesenou vrstvou lepidla se pomocí přípravků (např. svorek) zafixují a tím se vytvoří fyzikální a chemické podmínky vhodné pro vznik pevné vazby. Je důležité ponechat působit tlak po celou dobu tvrdnutí a po celé trvání reakce. Automobilový průmysl je v tomto směru specifický, protože potřebný tlak k vytvoření kvalitního spoje je zajištěn samotnou konstrukcí spoje, zejména u lemového spoje (obr. 5.5). [3] [7] [11]



Obr. 5.5: Řez lemovým spojem [18]

Jedná-li se o spoj bez lemu, potřebného tlaku se dosahuje pomocí bodového svažování, mechanického spojení nebo lisování. Při montáži spoje, který bude sloužit pouze k omezení šíření hluku a vibrací, tak s ohledem na použité lepidlo není zapotřebí přitlačného tlaku. Je to způsobeno tím, že lepidla během vytvrzování několikanásobně zvýší svůj objem a tím dojde k dokonalému vyplnění spáry. Dalším významným prvkem, který je při montáži spoje nutno zohlednit, jsou tzv. distance. Distance se využívají ke splnění předepsané tloušťky vrstvy lepidla ve spoji. V automobilovém průmyslu se využívá několika typů distancí. Jednou z možností je přidání příměsí obsahujících distanční kuličky do lepidla. Přimíchané kuličky

mají průměr odpovídající požadované tloušťce vrstvy lepidla. Alternativou kuliček mohou být distanční drátky. Ty se ovšem používají pouze v laboratorních podmínkách, protože technologický postup s nimi spojený je při stavbě karoserie nerealizovatelný. [3] [7] [11]

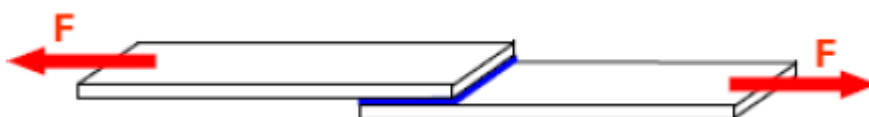
6. Zkoušky lepených spojů

Zkoušky lepených spojů se provádí za účelem simulování jejich chování v reálném provozu. Lepené spoje mohou být testovány statickým nebo dynamickým zatížením. U lepených spojů se zkouší pevnost a ostatní mechanické vlastnosti. Všechny vlastnosti se odvíjí od konstrukce a tvaru spoje, od materiálů, ze kterých se spoj skládá, od směru, způsobu a velikosti namáhání.

6.1. Zkouška pevnosti ve smyku při zatěžování tahem dle ČSN EN 1465

V různých průmyslových odvětvích je tato zkouška aplikačně modifikována pro aktuální potřeby hodnocení lepených spojů. Často to spočívá v odlišnosti rozměrů přeplátování, rozměrů vzorků apod. [3]

Zkouška spočívá v namáhání lepeného spoje statickým tahem ve smyku ve směru podélné osy až do přetržení a následné vyhodnocení pevnosti. Zkušební vzorek a směr jeho namáhání je schematicky znázorněn na obr. 6.1. [3]

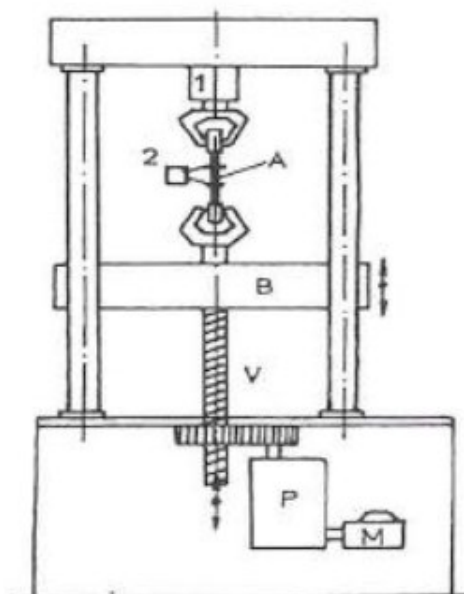


Obr. 6.1: Vzorek zkoušky pevnosti ve smyku [3]

Lepený vzorek má rozměry 25x100 mm. Přeplátování se určuje dle typu použitého lepidla. Pro výplňová lepidla to je 16 mm a pro pevnostní 12,5 mm. Lepidlo se nanáší na očištěný povrch v požadovaném množství. Pro pevnostní lepidla je stanovena vrstva lepidla o tloušťce 0,2 mm a pro výplňová lepidla 2 mm. Jednotnou tloušťku vrstvy lepidla ve spoji zajišťují distanční drátky, nebo skleněné kuličky o průměru rovnající se tloušťce vrstvy lepidla. Vzorky se po slepení a vytvrzení nechají alespoň 24 hodin odležet a poté se trhají na zkušebním stroji standardně o rychlosti 50 mm/min. Vzorky jsou zatěžovány při laboratorní teplotě. Vyhodnocuje se pevnost ve smyku a typ porušení lepeného spoje podle normy ISO 10 365. [3]

Pevnost ve smyku při zkoušce tahem se definuje vztahem maximální tahová síla na plochu lepeného spoje. [3]

$$\tau = \frac{F_{max}}{S} \quad (1)$$



Obr. 6.2: Univerzální trhací zkušební stroj

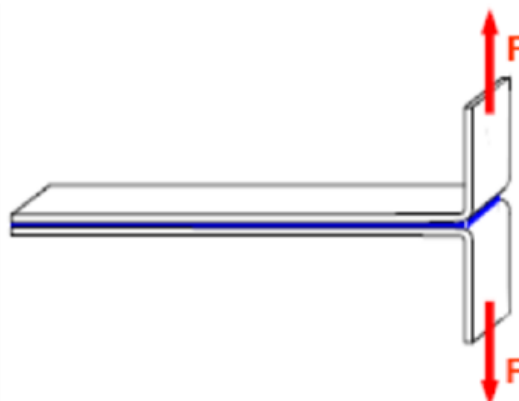
A- zkušební těleso, B- pohybový příčník, M- motor,

P- převodová skříň, V- vřeteno, 1- dynamometr, 2- průtahoměr [9]

6.2. T-zkouška v odlupování slepů z ohebných adherentů dle ČSN EN 14 173

Tato norma předepisuje metodu stanovení pevnosti v odlupování flexibilních adherentů slepených hodnoceným lepidlem. Zkušební tělesa jsou upravena do tvaru "T", hodnocení se provádí v běžné trhačce používané pro tahovou zkoušku. Při výpočtu výsledku se uvažuje průměrná síla potřebná pro oddělení adherentů, stanovená z grafického záznamu. [12]

Zkušební vzorek se skládá ze dvou plechů o rozměrech 200x25 mm ohnutých do pravého úhlu, lepená plocha má rozměry 150 x 25 mm. Vrstva lepidla ve spoji je podobně jakou u normy ČSN EN 1465 stanovena na 0,2 mm, nebo 2 mm. Jednotnou tloušťku vrstvy lepidla zajišťují distanční drátky o průměru 0,2 mm, nebo ocelové kuličky o průměru 2 mm. [3]



Obr. 6.3: Vzorek zkoušky pevnosti v odlupu [3]

6.3. Zkušební metoda pro hodnocení rázové pevnosti lepených spojů ve smyku dle ČSN EN ISO 9653

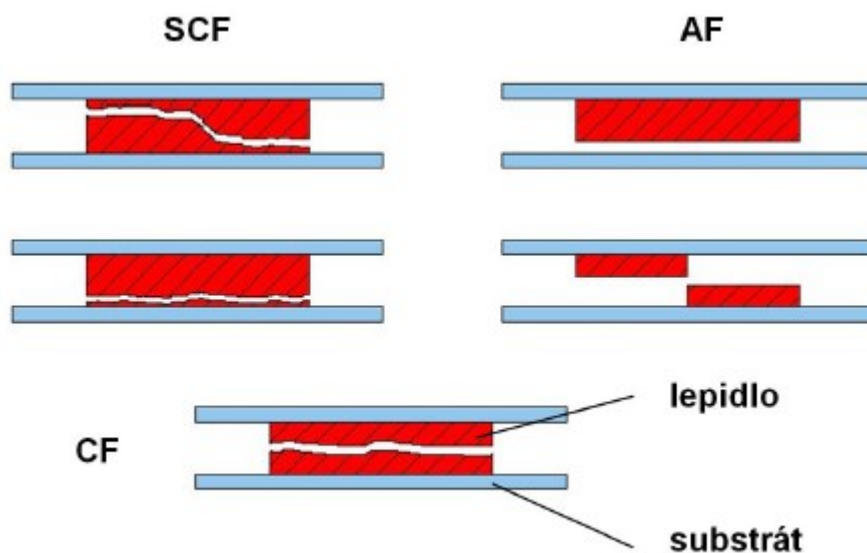
Tato zkouška se zabývá měřením rázové pevnosti lepeného spoje. Zkušební spoj vzorku je namáhán ve směru podélné osy rázovým tahem ve smyku. Vzorek je zatěžován až do okamžiku jeho porušení. Jednotka rázové pevnosti je $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$. [8]

6.4. Pevnost ve smyku při dlouhodobém staticky působícím zatížení

Jedná se o creepovou zkoušku, při které se měří délka vzájemného posunutí obou polovin lepeného vzorku za současného zjištění meze tečení. Používají se stejné vzorky jako pro ČSN EN 1465. Po ukončení zkoušky se vyhodnocuje maximální napětí ve smyku, při kterém se žádný z vzorků ze série pěti kusů neporuší během stanovené doby např. 200, 1 000 nebo 10 000 hodin. [13]

6.5. Hodnocení typu porušení lepeného spoje

Typy porušení lepeného spoje se vyhodnocují dle normy ČSN EN ISO 10365, která uvádí označení hlavních typů porušení lepeného spoje, a ilustruje typ porušení pomocí obrázků (viz obr. 6.4). Lze ji použít pro všechny mechanické zkoušky lepených spojů, bez ohledu na povahu adherendů a lepidla, tvořících lepený spoj. [14]



Obr. 6.4: Definované typy porušení slepených vzorků dle EN 10365 [3]

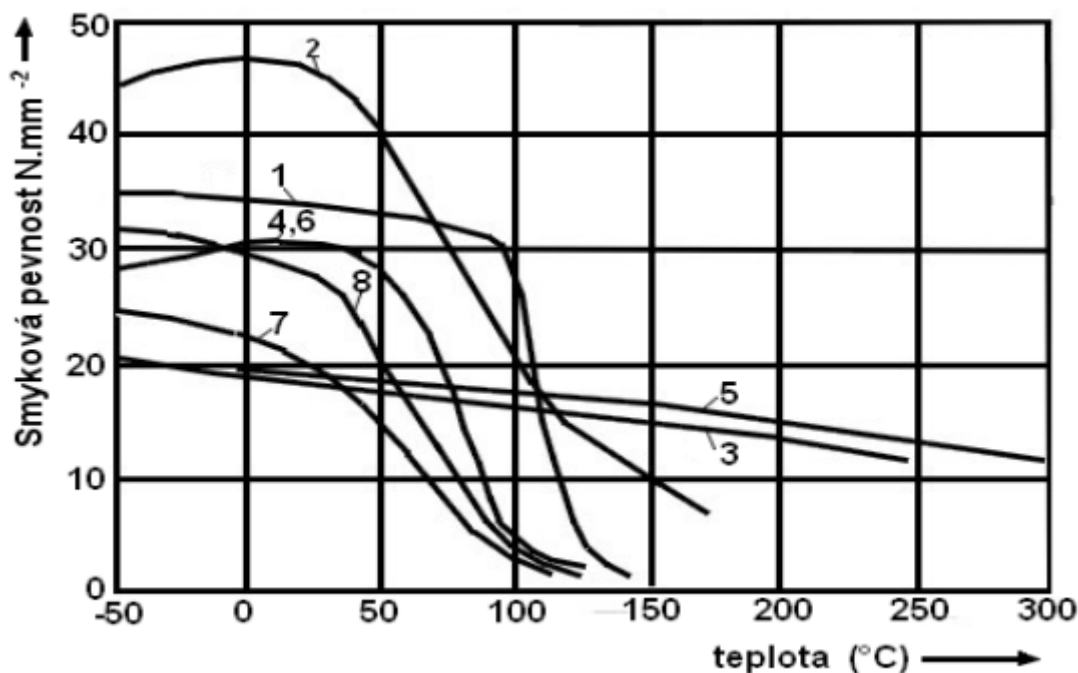
Typy porušení se rozdělují na speciální kohezní porušení (SCF), adhezní porušení (AF) a kohezní porušení (CF). Adhezním porušením je porušení na hranici adherentu a lepidla. Kohezním porušením je trhlinka vzniklá v lepidle. Speciální kohezní porušení (SCF) je porušení

na rozhraní adherentu a lepidla, ale nikoliv uprostřed. Jedná se o nejběžnější typ porušení v praxi. Při vyhodnocování se nedříve rozdělí lepená plocha na několik velikostně stejných částí a dále se pozorováním vyhodnocuje procentuální podíl jednotlivých typů porušení. V dnešní době existují softwary, které dovedou přesně vyhodnotit typ porušení lepeného spoje. [3]

6.6. Vliv teploty prostředí na pevnost lepidel

Lepidla jakožto jako polymerní látky často mění své vlastnosti v závislosti na teplotě. Svou důležitost má tzv. teplota zesklennění, označována také jako teplota skelného přechodu (T_g). Polymer, stejně jako sklo, po překročení teploty zesklennění ztrácí modul pružnosti v některých případech až o několik řádů a stává se z něj velmi elastická látka. [15]

Všeobecný přehled chování různých druhů lepidel v závislosti na působení teploty zobrazuje obr. 6.6. Smyková pevnosti závisí na napěťových podmínkách, které působí v lepidle. Tyto podmínky se odvíjejí od schopnosti plastické deformace lepidla. Lepidla s vysokou teplotní odolností mají omezenou možnost plastifikace a vykazují nízkou míru pevnosti. [15]



Obr. 6.5: Závislost smykové pevnosti na teplotě

1- epoxid, 2- epoxid-nylon, 3- fenol, 4- fenol-polyvinyl, 5- polymid,
6- epoxid-polyamid, 7- epoxid-polyaminoamid, 8- metakrylat [15]

Polymery mohou mít větší odolnost proti stárnutí než některé kovy. Proto se v praxi mnohdy používají k jejich ochraně. Toto znehodnocení se nazývá degradace, nikoliv koroze jako je tomu u kovů. Jedním z vlivů ovlivňujícím degradaci polymeru může být vysoká teplota

prostředí. Existuje mnoho druhů lepidel, kdy každé má jiné chemické složení, a proto každé lepidlo bude mít jiné kritické teploty ovlivňující jejich mechanické vlastnosti. Obecně je degradace polymerů při zvýšených teplotách důsledkem difúze. Při tomto tepelně aktivovaném ději látka postupuje z jedné fáze do jiné ve směru nižší koncentrace a tlaku. Nevratně se tak změní chemické složení a vlastnosti polymeru. Difúze má za následek změnu molekulárních řetězců, porušování vazeb mezi atomy a vznik nových reakcí. Lepené spoje tím velmi často nenávratně ztratí svou smykovou pevnost. V provozu nastane nejčastěji vlivem mechanického nebo tepelného namáhání, ke kterému může dojít mimo jiné i při vytvrzovacím procesu. [16]

Experimentální část

7. Návrh experimentálního plánu

Cílem práce bylo vytvořit studii o závislosti pevnosti lepených spojů na vnějších podmínkách a vznikly tyto dva experimenty, zkouška závislosti na teplotě a zkouška závislosti na vlhkosti prostředí. K experiment bylo využito dvou lepidel, 3M 7260 B/A FC, dále značeno jako lepidlo A, a lepidlo Würth POWERBOND, dále značeno jako lepidlo B. Všechny stykové plochy byly očištěné laserem.

Jednotlivé úkony experimentálního plánu jsou:

- očištění vzorků,
- příprava lepícího prostředí,
- příprava lepidla,
- nanášení lepidla,
- montáž spoje,
- vytvrzení,
- obroušení nadbytečného lepidla,
- zkouška závislosti na teplotě,
- zkouška závislosti na vlhkosti prostředí,
- vyhodnocení výsledků.

Pro veškeré potřeby této práce byly využity prostory a zařízení StudentCar katedry materiálů a technologií pro automobilový průmysl, VŠB-TUO.

7.1. Testovací vzorky

Pro účely experimentu byly použity vzorky ze Al slitiny EN AW 5754 nařezané na rozměry 100 x 25 x 3 mm, které jsou předepsány pro zkoušku pevnosti ve smyku dle ČSN EN 1465.



Obr. 7.1: Testovací vzorky z Al slitiny EN AW 5754

Chemické složení a vybrané mechanické a technické vlastnosti Al slitiny EN AW 5754 jsou k vidění v tab. 7.1 a 7.2. Více informací jsou k dočtení v technickém listu Al slitiny, viz příloha č. 1.

Tab. 7.1: Chem. složení a mech. vlastnosti Al slitiny EN AW 5754

Chem. složení [hm. %]	Povrch	Mez kluzu R_p [MPa]	Pevnosti v tahu R_m [MPa]	Tažnost A [%]
AlMg3	H111	80	190 - 240	16 - 17

Tab. 7.2: Technické vlastnosti Al slitiny EN AW 5754

Stav materiálu	Tvarová stálost	Použití při vysokých teplotách (dlouhodobé/krátkodobé zatížení) [°C]
válcovaný povrch	přijatelná	120/180

Korozní odolnost	Svařitelnost	Obrobitelnost
velmi dobrá	dobrá	přijatelná

7.2. Očištění vzorků

Součástí experimentálního plánu bylo očištění zkušebních vzorků laserem.

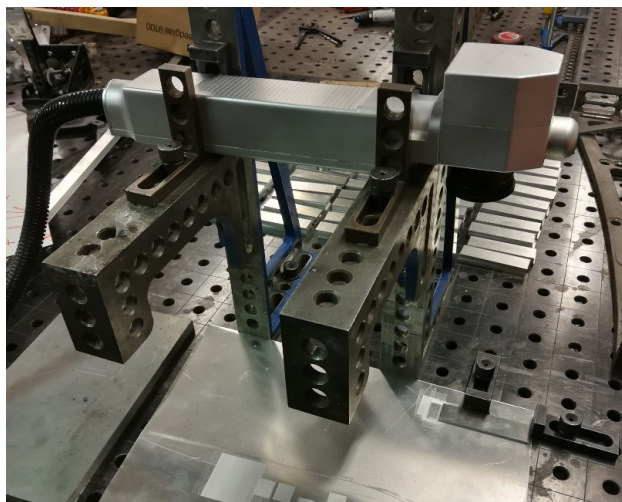
Testovací vzorky dorazily umaštěné chladicí kapalinou a místy byly patrné otřepy na hranách vzorků z řezání. Proto před samotným laserováním bylo zapotřebí nečistoty a nadbytečný materiál odstranit. K odstranění otřepů na hranách vzorků byl použit standardní ruční zámečnický pilník a kapalně nečistoty byly setřeny textilií.

K laserovému očištění stykových ploch vzorků byl použit vláknový laserový čistící stroj MRJ-FJ-C120C. Jedná se o vysoce výkonný laser třídy 4 dosahující 120 W. Nevhodným užíváním stroje hrozí vysoké nebezpečí poškození zdraví, proto musí obsluha při práci se strojem využívat ochranných pomůcek a dbát na bezpečnost práce, viz příloha č.2: *Provozní řád laserového čistícího stroje*. Detailní technické parametry stroje jsou k nalezení v příloze č. 3.

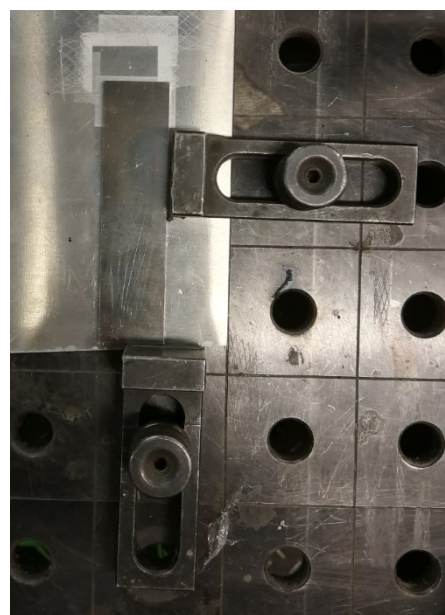


Obr. 7.2: Vláknový laserový čistící stroj MRJ-FJ-C120C

Pro účely této práce vznikla laserovací stanice, viz obr. 7.3. Pro usnadnění a zlepšení produktivity práce byly pod hlavu laseru upevněny vymežovací přípravky, které pomáhaly s přesným umístěním testovacích vzorků, viz obr. 7.4.

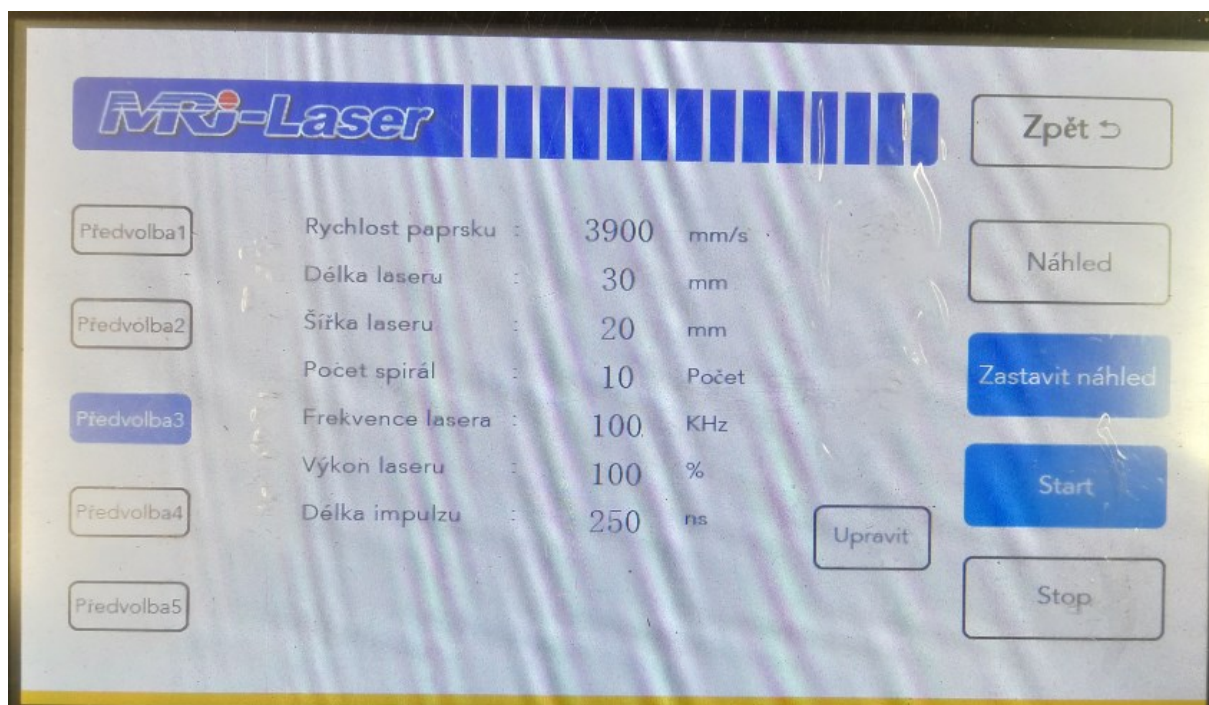


Obr. 7.3: Laserovací stanice



Obr. 7.4: Vymežovací přípravky pro umístění testovacích vzorků

Nastavení parametrů laseru je zobrazeno na obr. 7.5.



Obr. 7.5: Parametry laseru

Překrytí vzorků bylo 12 mm, ale pro jistotu smáčení celé lepené plochy bylo očištěno přibližně 14 mm.



Obr. 7.6: Očištěný testovací vzorek

7.3. Příprava lepicího prostředí

Dalším krokem bylo vytvoření speciálního prostředí pro zajištění požadovaných rozměrů spoje. Pomocí vymezovacích přípravků upevněných na svářečský stůl jsme vytvořili lepicí prostředí, které umožňovalo rychlou a přesnou montáž spojů. Přípravek na vodorovné ploše byl upevněn 88 mm od hrany kraje stolu, tak aby testovací vzorek přečínal o 12 mm, což je délka překrytí spoje. Svislý přípravek byl uchycen 3,3 mm pod vrchní hranu stolu, tak aby při montáži spoje na něj mohl být položen vzorek o výšce 3 mm a zbylou 0,3 mm mezeru vyplní vrstva lepidla. Nakonec byly plochy stolu polepeny malířskou papírovou lepicí páskou, aby se přebytečné lepidlo nezachytávalo na stole.



Obr. 7.7: Lepicí prostředí

7.4. Příprava a nanášení lepidla

Obě lepidla použitá v tomto experimentu byla dvousložková, což znamená, že se musela bezprostředně před aplikací promíchat. K dávkování lepidla byla použita pistole Loctite s přívodem stlačeného vzduchu.



Obr. 7.8: Dávkovací pistole Loctite

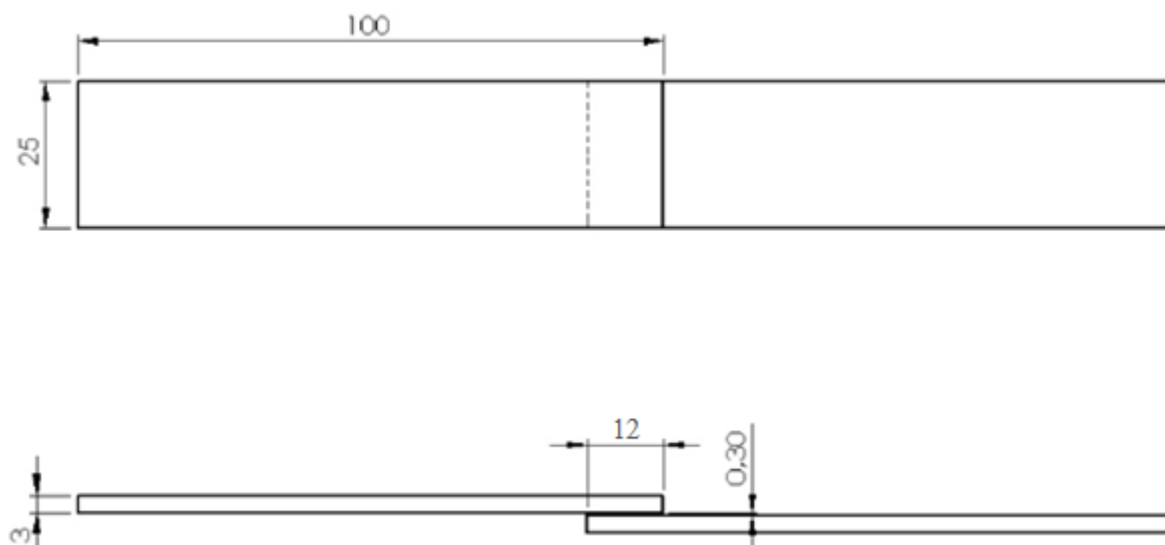
Lepidlo bylo naneseno pouze na jeden vzorek a vždy bylo použito více lepidla, aby došlo ke smáčení celé lepené plochy. Přebytké lepidlo se po zatížení spoje vytlačí.



Obr. 7.9: Nanesení lepidla na vzorek

7.5. Montáž spoje

Povrchově upravené vzorky z Al slitiny EN AW 5754 byly slepeny v souladu s normou ČSN EN 1465, viz obr. 7.10.



Obr. 7.10: Schéma montáže lepeného spoje

Montáž spoje probíhala při okolních podmínkách způsobem, kdy se nejdříve položil spodní díl spoje s nanesenou vrstvou lepidla na přípravek upevněný 3,3 mm pod vrchní stranou stolu a kolmo přitlačil k hraně stolu. Tloušťka lepené vrstvy byla dle dodavatele lepidla stanovena na 0,3 mm a délka přeplátování na 12 mm. Dalším krokem bylo přeplátování vrchním dílem spoje očištěnou stranou k lepidlu při kolmém přitlačení vzorku k přípravku upevněném 88 mm vodorovně od hrany stolu, viz obr. 7.11. Za účelem dokonalého smáčení povrchu byly zkušební vzorky po dobu vytvrzení zatíženy.



Obr. 7.11: Montáž spojů

Vytvrzení probíhalo po dobu 72 hodin při okolní teplotě cca 22 °C za působení statické zatěžovací síly. Po odlehčení vzorků bylo veškeré nadbytečné lepidlo, které vytvrdlo mimo oblast překrytí obroušeno pneumatickou excentrickou bruskou, protože by mohlo ovlivnit výsledky zkoušky.



Obr. 7.12: Vzorek s nadbytečným lepidlem



Obr. 7.13: Obroušený vzorek



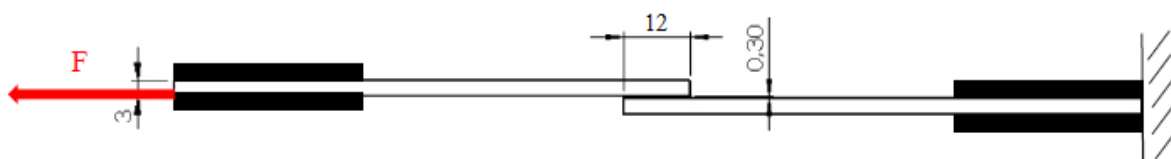
Obr. 7.14: Pneumatická excentrická bruska

Tímto způsobem byly připraveny všechny sady lepených spojů.

8. Zkoušky závislosti na teplotě

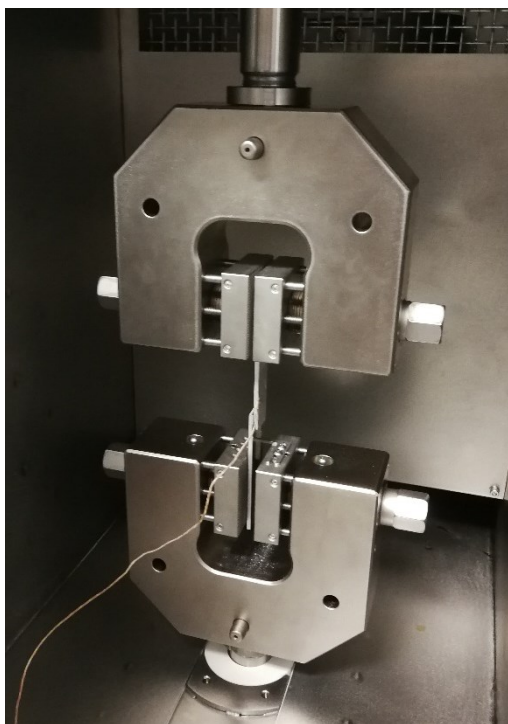
Zkouška spočívala v měření pevností spojů za namáhání zkušebních vzorků teplotním rozmezím od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$, s odstupňováním po $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Principem zkoušky bylo zahřátí klimakomory na požadovanou teplotu, výdrž na této teplotě do doby, kdy se rovněž vzorek ustálil na této teplotě a provedení smykové pevnostní zkoušky dle ČSN EN 1465 na trhačím zkušebním stroji. Zjišťována byla maximální smyková pevnost a prodloužení spoje. Celkem bylo připraveno pět vzorků pro každou sadu. Součet činil 70 lepených spojů (140 kusů plechu).

Schéma zatížení lepeného spoje při smykové pevnostní zkoušce lze vidět na obr. 8.1.



Obr. 8.1: Schéma zatížení zkušebního vzorku upnutého v čelistech trhačího stroje

K měření teploty vzorku byl vyroben termočlánek. Termočlánek byl přichycen na vnější plochu zkušebního vzorku a zapojen do multimetru s funkcí měření teploty, viz obr. 8.2 a 8.3.



Obr. 8.2: Lepený spoj s termočlánkem upnutý v čelistech trhačího stroje



Obr. 8.3: Termočlánek zapojený do multimetru

K provedení experimentů byla použita klimakomora Tensile Test–Climate Chamber, TensileEvent firmy Weiss Technik, katalog viz. příloha č. 6, a trhací stroj SHIMADZU AGS-X, technický list, viz příloha č. 7. Tato dvě zařízení jsou spolu kompatibilní a to tak, že klimakomora se nasune do pracovní části trhacího stroje. Čelisti trhacího stroje svírající testovací vzorek, a tak mohou být zavřeny ve vnitřních prostorách klimakomory.



Obr. 8.4: Trhací stroj SHIMADZU AGS-X spojen s klimakomorou Weissttechnik

Výstupem ze zkoušky je závislost síly na prodloužení vzorku. Ze zjištěné maximální síly a plochy lepeného spoje lze vypočítat smykové napětí dle následujícího vztahu:

$$\tau = \frac{F_{max}}{S} \quad (1)$$

- τ – pevnost ve smyku [MPa],
 F_{max} – maximální síla spoje [N],
 S – plocha lepeného spoje [mm²].

Z vypočtených a změřených hodnot byl vypočten modul pružnosti. Je nezbytné, aby se modul pružnosti nacházel v platnosti Hookova zákona, proto se počítalo se silou 1000 N, viz následující vztah:

$$E = \frac{F_{1000}}{S} \cdot \frac{l_o}{\Delta l_{1000}} \quad (2)$$

E – modul pružnosti [MPa],

F_{1000} – síla v platnosti Hookova zákona; zvolena na 1000 N [N],

Δl_{1000} – prodloužení vzorku při zátěži 1000 N [mm],

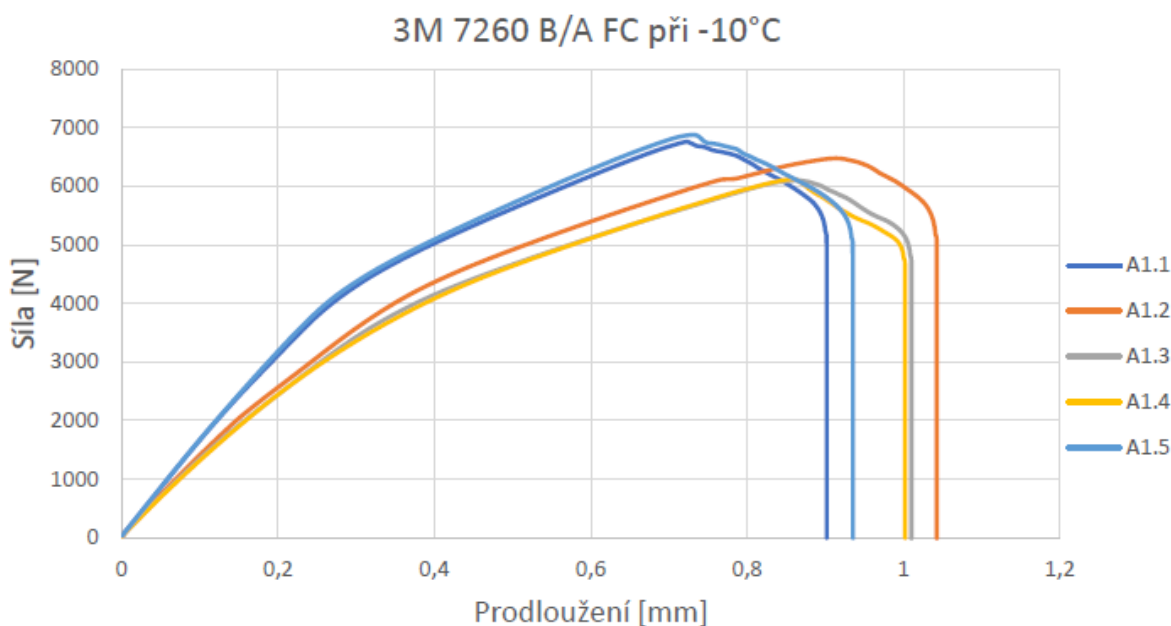
l_o – počáteční délka vzorku [mm].

8.1. Teplotní zkoušky lepidla 3M 7260 B/A FC

K první části zkoušení pevnosti lepených spojů v závislosti na teplotě bylo použito vysokopevnostní dvousložkové lepidlo 3M 7260 B/A FC, dále značeno jako lepidlo A. Detailní výpis vlastností tohoto lepidla je k dispozici v technickém listu viz příloha č. 4.

8.1.1. Lepidlo A při -10 °C

Následující naměřené hodnoty vypovídají o chování lepidla A při teplotě -10 °C.



Obr. 8.5: Tahové zkoušky lepených spojů A1 při -10 °C

Tab. 8.1: Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů A1 při -10 °C

	A1.1	A1.2	A1.3	A1.4	A1.5	\bar{x}
F_{\max} [N]	6755,90	6474,14	6098,66	6120,81	6875,12	6464,92 \pm 317,99
τ_{\max} [MPa]	22,52	21,58	20,33	20,40	22,92	21,55 \pm 1,06
Δl [mm]	0,72	0,91	0,86	0,86	0,73	0,82 \pm 0,08
E [MPa]	5685,86	4845,55	4621,61	4847,06	5718,37	5143,69 \pm 463,39

Vzorky měly poměrně srovnatelný průběh a výsledky zkoušky. Průběh zkoušek vzorků A1.1 a A1.5 se lehce odlišoval od ostatních, ale stále lze vidět jistou podobnost k ostatním třem vzorkům. Průměrná pevnost lepidla A za působení teploty -10 °C byla naměřena na 21,55 MPa a průměrné prodloužení 0,82 mm.



Obr. 8.6: Porušení lepených spojů A1 při $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

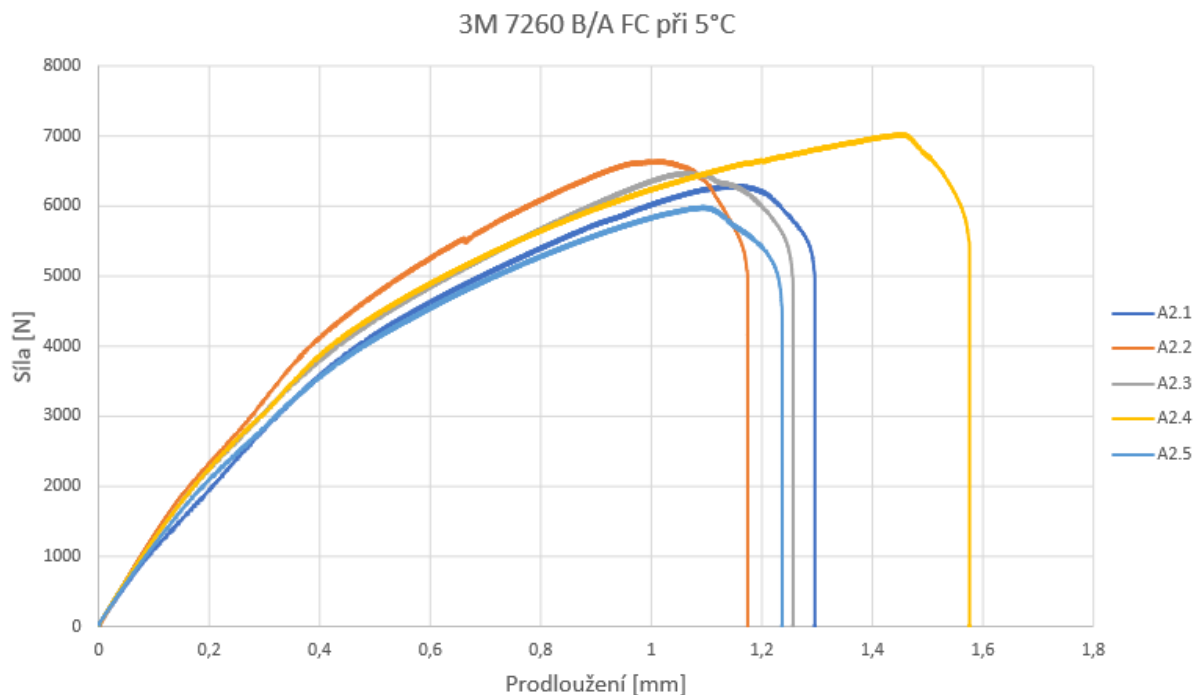
Všechny vzorky ze sady A1 selhaly důsledkem adhezivního porušení (AF), viz obr. 8.6.



Obr. 8.7: Ohnutí lepeného spoje A1 při teplotě $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

8.1.2. Lepidlo A při 5 °C

Následující naměřené hodnoty vypovídají o chování lepidla A při teplotě 5 °C.

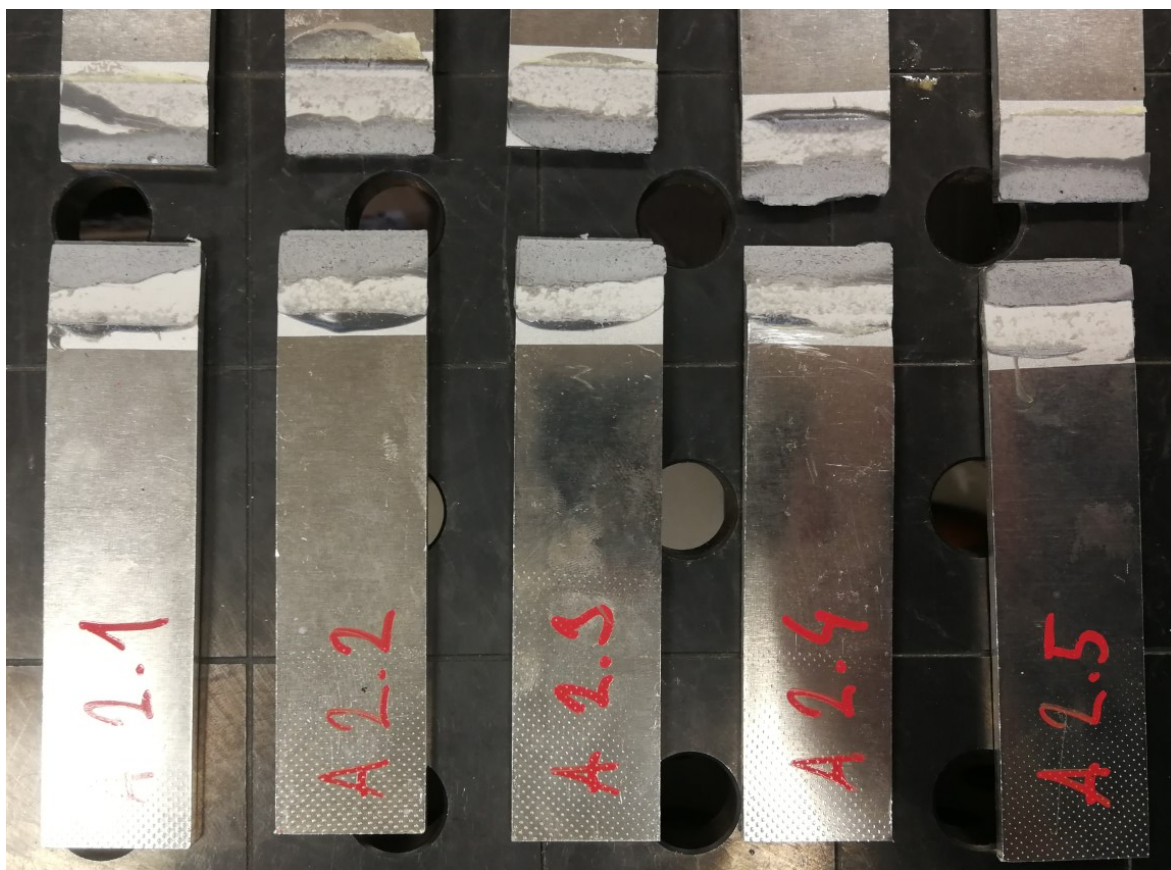


Obr. 8.8: Tahové zkoušky lepených spojů A2 při 5 °C

Tab. 8.2: Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů A2 při 5 °C

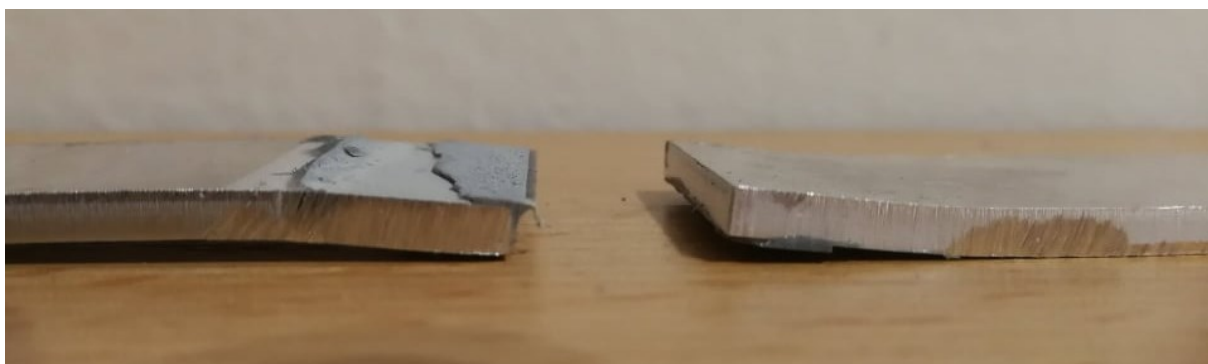
	A2.1	A2.2	A2.3	A2.4	A2.5	\bar{x}
F_{\max} [N]	6275,71	6629,13	6468,11	7013,78	5975,72	6472,49 ±347,29
τ_{\max} [MPa]	20,92	22,10	21,56	23,38	19,92	21,57 ±1,16
Δl [mm]	1,16	1,02	1,07	1,45	1,09	1,16 ±0,16
E [MPa]	3848,00	4398,02	4240,66	4239,53	3909,11	4127,07 ±211,82

Téměř všechny vzorky měly poměrně srovnatelný průběh a výsledky zkoušky. Vysoké prodloužení u vzorku A2.4 bylo pravděpodobně způsobeno nedostatečně silným upnutím vzorku a posunutím vzorku v čelistech během průběhu zkoušky. Průměrná pevnost lepidla A za působení teploty 5 °C byla naměřena na 21,57 MPa, což je téměř identická pevnosti jako při teplotě -10 °C. Průměrné prodloužení ovšem bylo větší, naměřeno bylo 1,16 mm.



Obr. 8.9: Porušení lepených spojů A2 při 5 °C

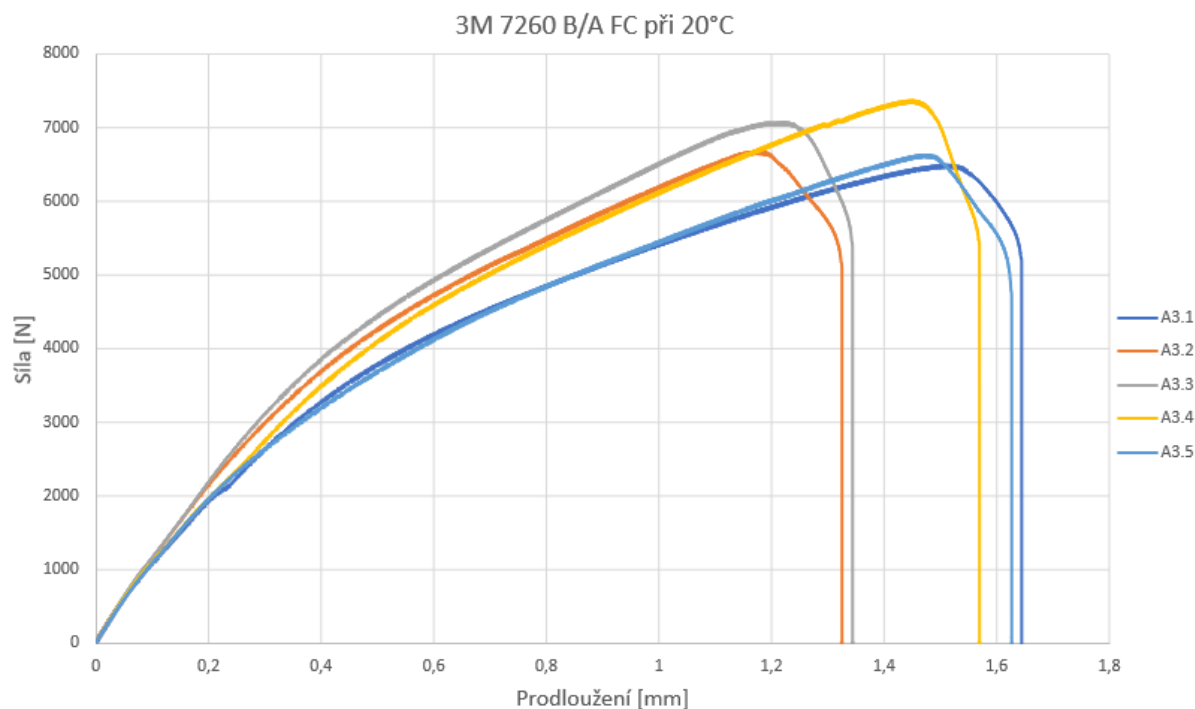
Vzorky ze sady A2 převážně selhaly důsledkem adhezivního porušení (AF) s lehkým náznakem kohezního porušení na rozhraní adherentu a lepidla, což indikuje speciální kohezní porušení (SCF), viz obr. 8.9.



Obr. 8.10: Ohnutí lepeného spoje A2 při teplotě 5 °C

8.1.3. Lepidlo A při 20 °C

Následující naměřené hodnoty vypovídají o chování lepidla A při pokojové teplotě 20 °C

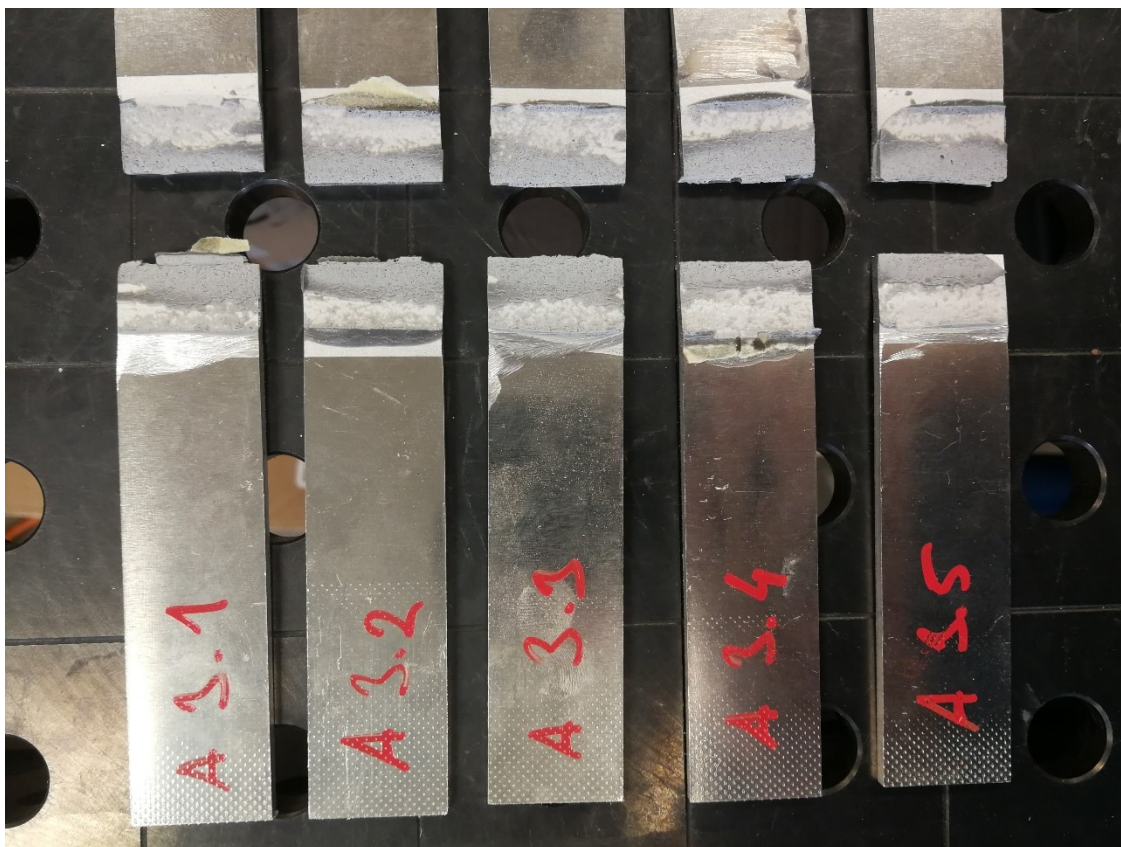


Obr. 8.11: Tahové zkoušky lepených spojů A3 při 20 °C

Tab. 8.3: Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů A3 při 20 °C

	A3.1	A3.2	A3.3	A3.4	A3.5	\bar{x}
F_{\max} [N]	6477,08	6661,11	7056,67	7353,14	6615,97	$6832,8 \pm 323,7$
τ_{\max} [MPa]	21,59	22,20	23,52	24,51	22,05	$22,78 \pm 1,08$
Δl [mm]	1,51	1,17	1,22	1,45	1,47	$1,37 \pm 0,14$
E [MPa]	3638,84	3840,61	4018,08	3782,51	3678,16	$3791,64 \pm 134,15$

Vzorky měly srovnatelný charakter průběhu a srovnatelné výsledky zkoušky. Průměrná pevnost lepidla A při pokojové teplotě byla naměřena na 22,78 MPa a průměrné prodloužení 1,37 mm.



Obr. 8.12: Porušení lepených spojů A3 při 20 °C

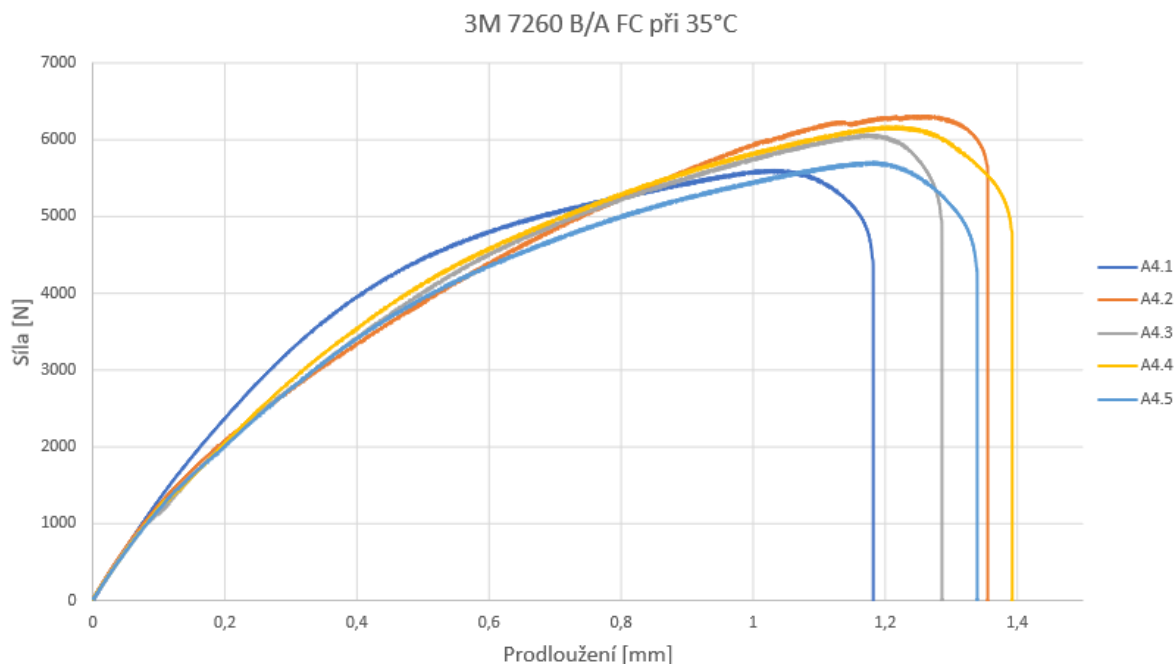
K selhání vzorků sady A3 došlo na rozhraní adherentu a lepidla, ale nikoliv uprostřed, viz obr. 8.12. Jedná se o speciální kohezní porušení a v praxi jde o nejběžnější typ porušení.



Obr. 8.13: Ohnutí lepeného spoje A3 při teplotě 20 °C

8.1.4. Lepidlo A při 35 °C

Následující naměřené hodnoty vypovídají o chování lepidla A při teplotě 35 °C.

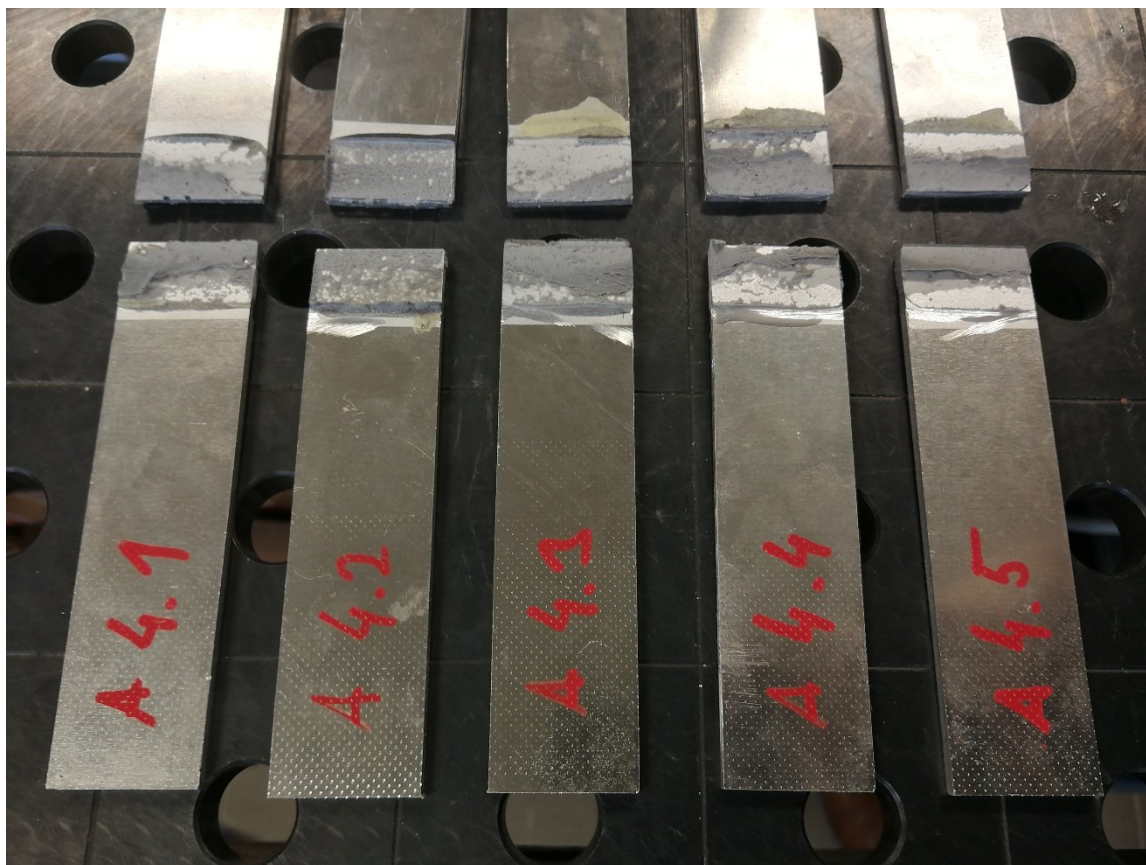


Obr. 8.14: Tahové zkoušky lepených spojů A4 při 35 °C

Tab. 8.4: Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů A4 při 35 °C

	A4.1	A4.2	A4.3	A4.4	A4.5	\bar{x}
F_{max} [N]	5590,97	6296,54	6052,46	6151,89	5691,92	5956,75 \pm 270,79
τ_{max} [MPa]	18,64	20,99	20,17	20,51	18,97	19,86 \pm 0,9
Δl [mm]	1,03	1,26	1,17	1,21	1,18	1,17 \pm 0,08
E [MPa]	4448,15	4313,83	4035,31	4118,4	4043,47	4191,83 \pm 162,78

Vzorky měly srovnatelný charakter průběhu a srovnatelné výsledky zkoušky. Můžeme si všimnout, že už lehce zvýšená teplota ovlivňuje vlastnosti spoje. Byla naměřena průměrná pevnost lepidla 19,86 MPa, což je o 12,8 % méně než při pokojové teplotě. Prodloužení se také snížilo. Naměřeno bylo průměrné prodloužení 1,17 mm, což je o 14,6 % méně než při pokojové teplotě.



Obr. 8.15: Porušení lepených spojů A4 při 35 °C

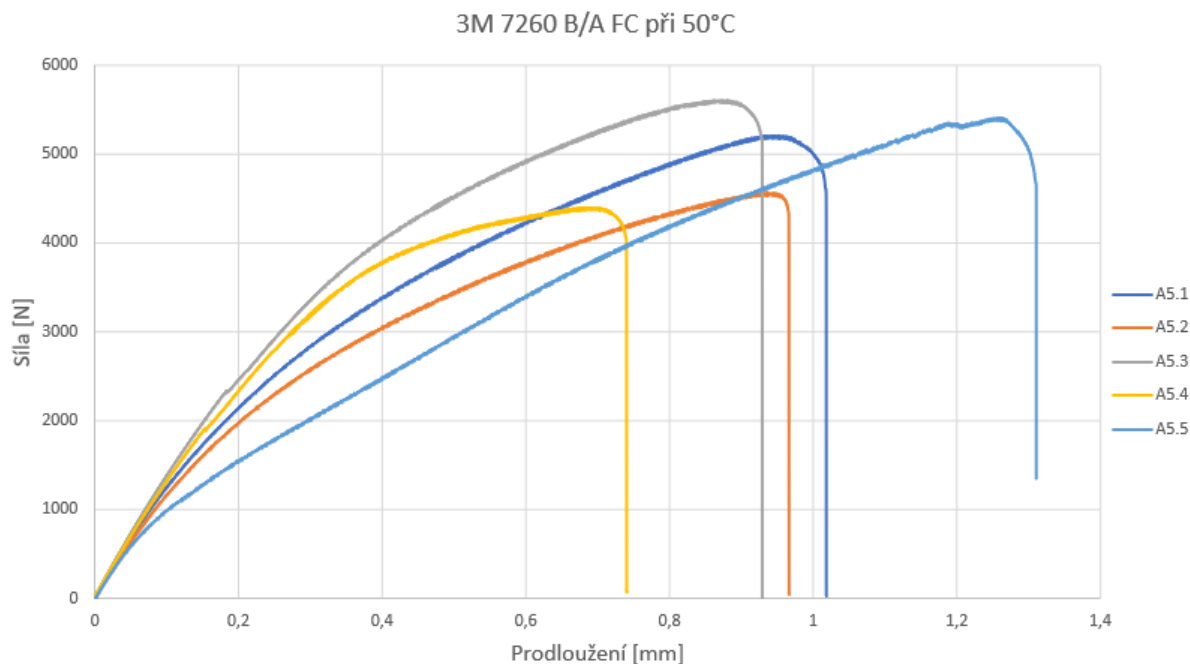
Selhání vzorků sady A4 byla kombinace kohezního porušení (CF) a speciálně kohezního porušení (SCF), viz obr. 8.15.



Obr. 8.16: Ohnutí lepeného spoje A4 při teplotě 35 °C

8.1.5. Lepidlo A při 50 °C

Následující naměřené hodnoty vypovídají o chování lepidla A při teplotě 50 °C.



Obr. 8.17: Tahové zkoušky lepených spojů A5 při 50 °C

Tab. 8.5: Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů A5 při 50 °C

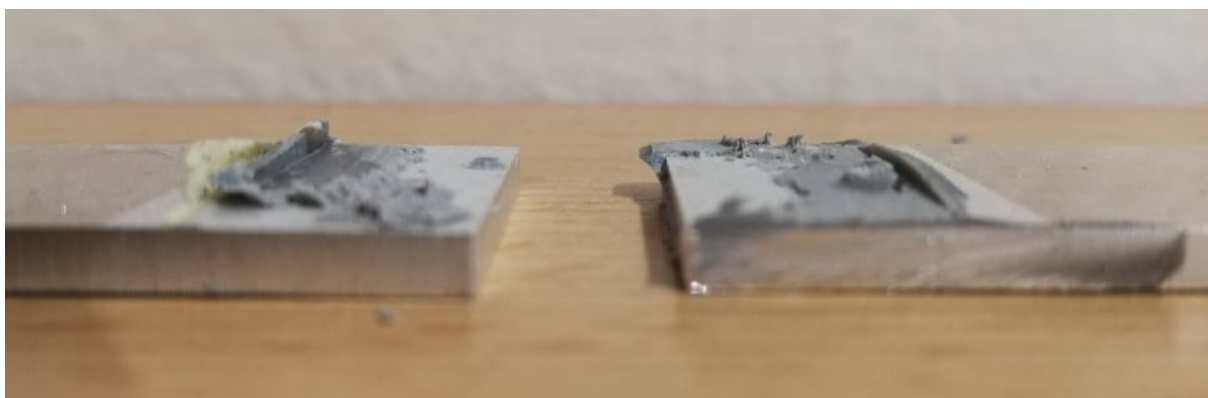
	A5.1	A5.2	A5.3	A5.4	A5.5	\bar{x}
F_{\max} [N]	5194,75	4549,49	5592,37	4386,47	5393,68	5023,35 \pm 473,38
τ_{\max} [MPa]	17,32	15,16	18,64	14,62	17,98	16,74 \pm 1,58
Δl [mm]	0,95	0,94	0,87	0,69	1,26	0,94 \pm 0,18
E [MPa]	4303,39	3962,36	4742,15	4518,5	3248,07	4154,89 \pm 521,25

Vzorky měly při 50 °C nečekaně rozdílný průběh zkoušky. Tato nepřesnost byla pravděpodobně způsobena chybou při montáži spoje, kdy nebyla dodržena stejná výška vrstvy lepidla. Se zvyšující se teplotou měření se nadále ukazuje snížení pevnosti spoje oproti předchozímu testu. Byla naměřena průměrná pevnost lepidla 16,76 MPa, což je o 26,4 % méně než při pokojové teplotě. A průměrné prodloužení bylo změřeno na 0,94 mm, což je o 31,4 % méně než při pokojové teplotě.



Obr. 8.18: Porušení lepených spojů A5 při 50 °C

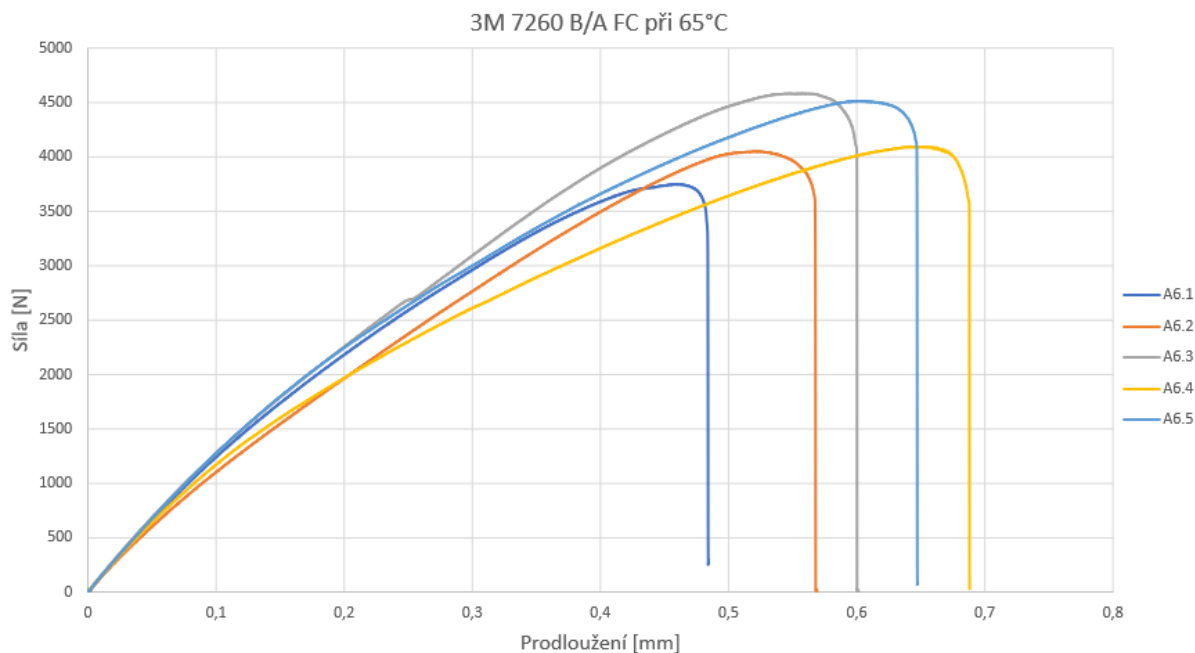
Selhání vzorků sady A5 byla kombinace speciálně kohezního porušení (SCF) a adhezivního porušení (AF) , viz obr. 8.18.



Obr. 8.19: Ohnutí lepeného spoje A5 při teplotě 50 °C

8.1.6. Lepidlo A při 65 °C

Následující naměřené hodnoty vypovídají o chování lepidla A při teplotě 65 °C.



Obr. 8.20: Tahové zkoušky lepených spojů A6 při 65 °C

Tab. 8.6: Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů A6 při 65 °C

	A6.1	A6.2	A6.3	A6.4	A6.5	\bar{x}
F_{max} [N]	3746,66	4047,72	4580,20	4089,93	4511,06	4195,11 ±310,49
τ_{max} [MPa]	12,49	13,49	15,27	13,63	15,04	13,98 ±1,03
Δl [mm]	0,46	0,52	0,55	0,64	0,60	0,56 ±0,06
E [MPa]	4257,58	3740,07	4408,93	4027,18	4379,96	4162,74 ±250,53

Vzorky měly při 65 °C podobný průběh experimentu, ale odlišné vypovídající hodnoty. Vzorky bylo v takto vysokých teplotách velmi obtížné udržet na konstantní teplotě, a to mohlo způsobit vzniklé nepřesnosti. Se zvyšující se teplotou měření se nadále projevuje snížení pevnosti spoje oproti předchozímu testu. Byla naměřena průměrná pevnost lepidla 13,98 MPa, což je o 38,6 % méně než při pokojové teplotě. A průměrné prodloužení bylo změřeno na pouhých 0,56 mm, což je o 59,1 % méně než při pokojové teplotě.



Obr. 8.21: Porušení lepených spojů A6 při 65 °C

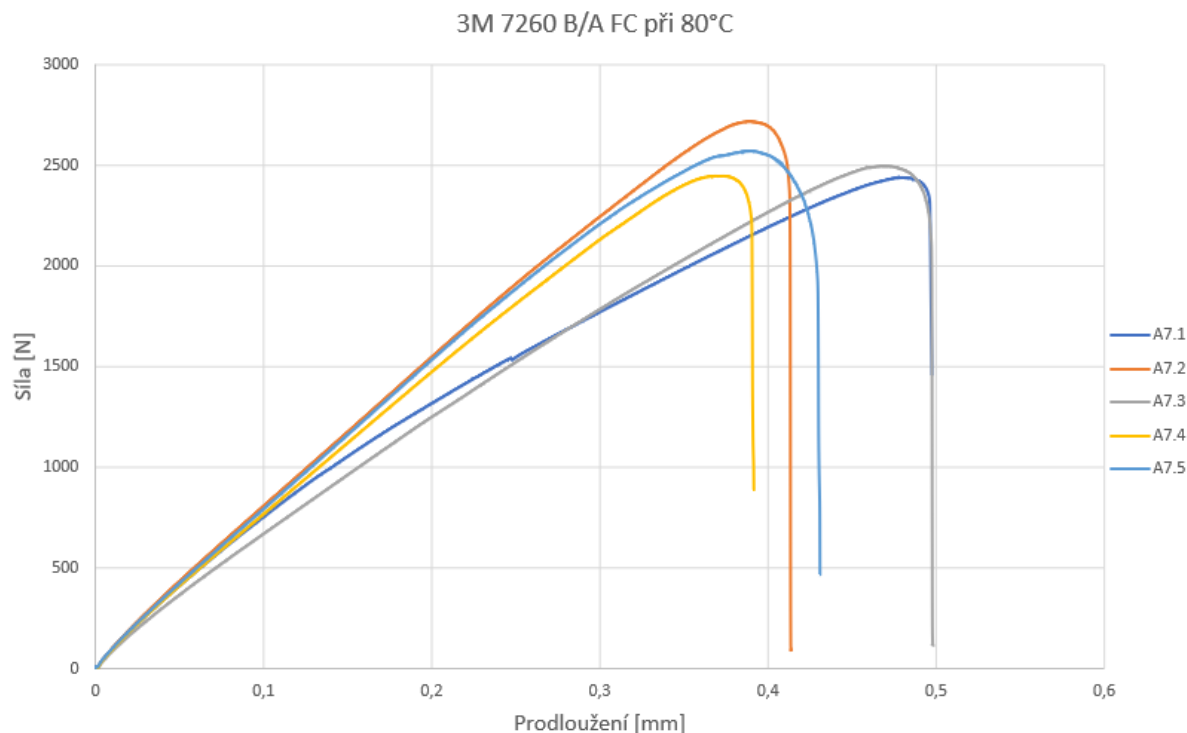
Všechny vzorky ze sady A6 selhaly důsledkem adhezivního porušení (AF), viz obr. 8.21



Obr. 8.22: Ohnutí lepeného spoje A6 při teplotě 65 °C

8.1.7. Lepidlo A při 80 °C

Následující naměřené hodnoty vypovídají o chování lepidla A při teplotě 80 °C.

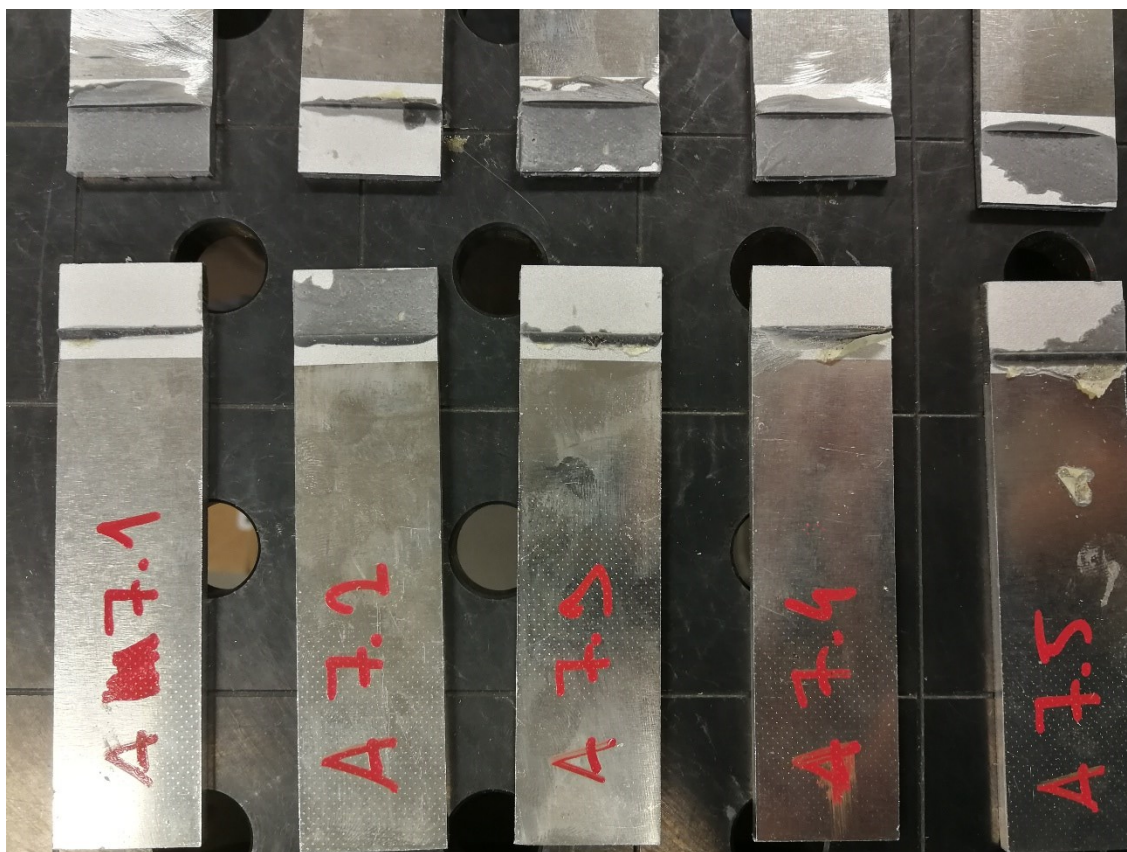


Obr. 8.23: Tahové zkoušky lepených spojů A7 při 80 °C

Tab. 8.7: Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů A7 při 80 °C

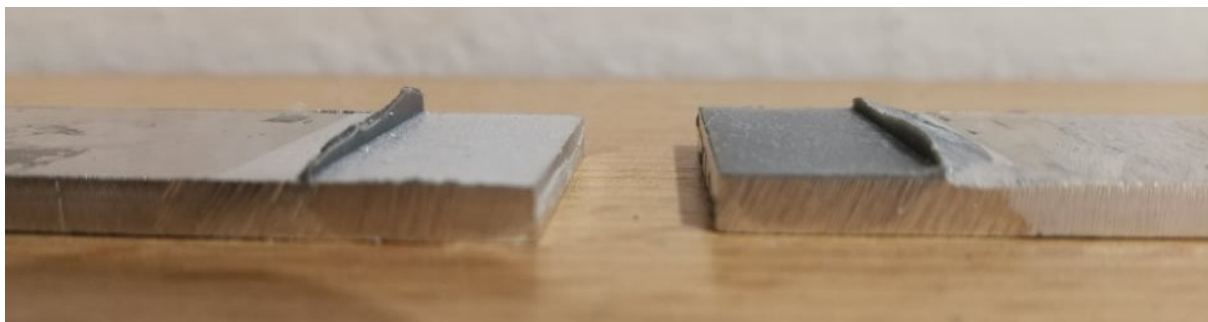
	A7.1	A7.2	A7.3	A7.4	A7.5	\bar{x}
F_{max} [N]	2439,58	2717,34	2495,85	2447,00	2571,13	2534,18 ±102,89
τ_{max} [MPa]	8,13	9,06	8,32	8,16	8,57	8,45 ±0,34
Δl [mm]	0,48	0,39	0,47	0,37	0,39	0,42 ±0,044
E [MPa]	2370,72	2642,88	2130,78	2507,05	2597,82	2449,85 ±184,66

Vzorky měly srovnatelný charakter průběhu a srovnatelné výsledky zkoušky. Se zvyšující se teplotou měření nadále ukazuje snížení pevnosti spoje oproti předchozímu testu. Průměrná pevnost lepidla byla naměřena pouhých 8,45 MPa, což je o 62,9 % méně než při pokojové teplotě. Prodloužení se také snížilo. Naměřeno bylo průměrné prodloužení 0,42 mm, což je o 69,3 % méně než při pokojové teplotě.



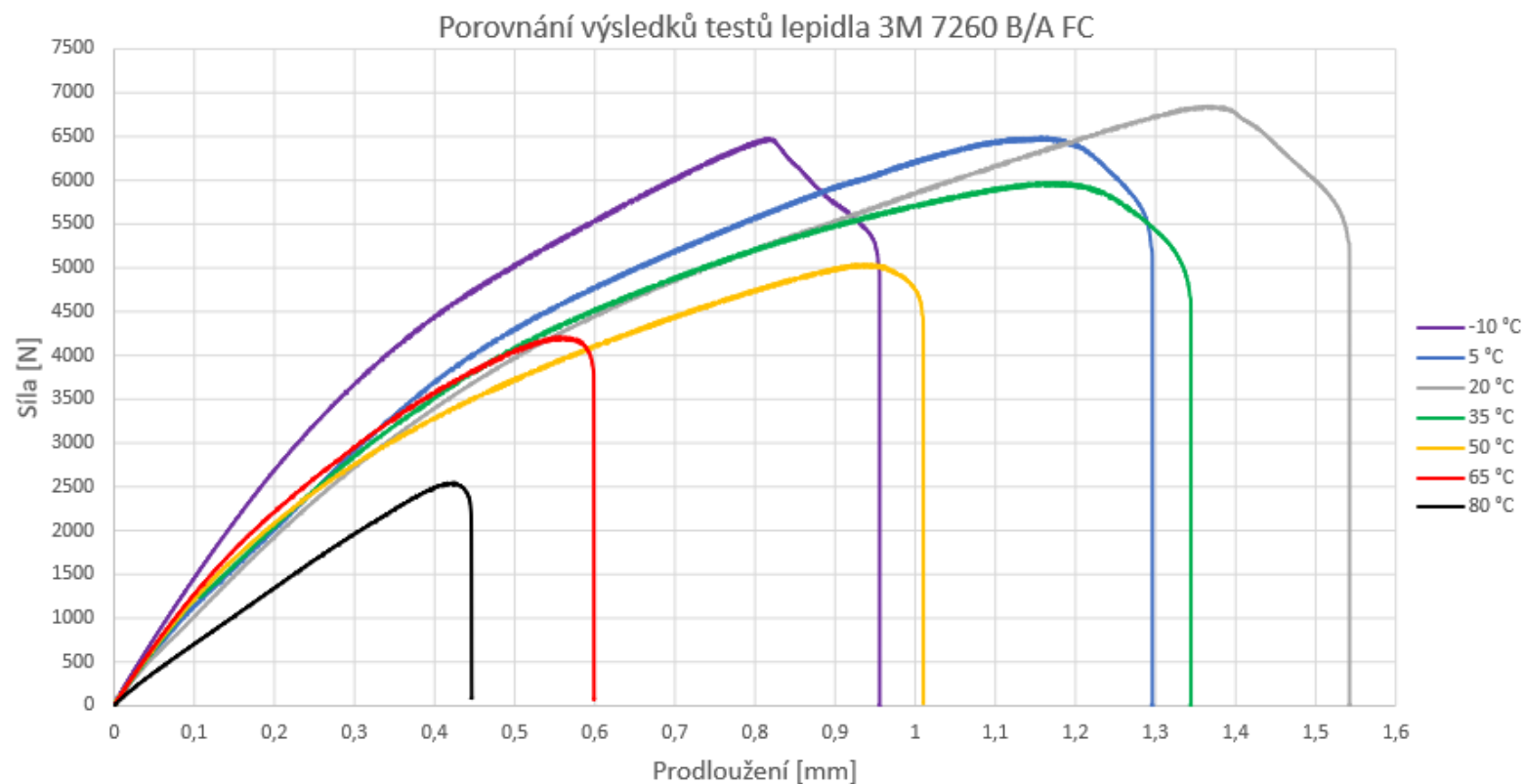
Obr. 8.24: Porušení lepených spojů A7 při 80 °C

Všechny vzorky ze sady A7 selhaly důsledkem adhezivního porušení (AF), viz obr. 8.24.



Obr. 8.25: Ohnutí lepeného spoje A7 při teplotě 80 °C

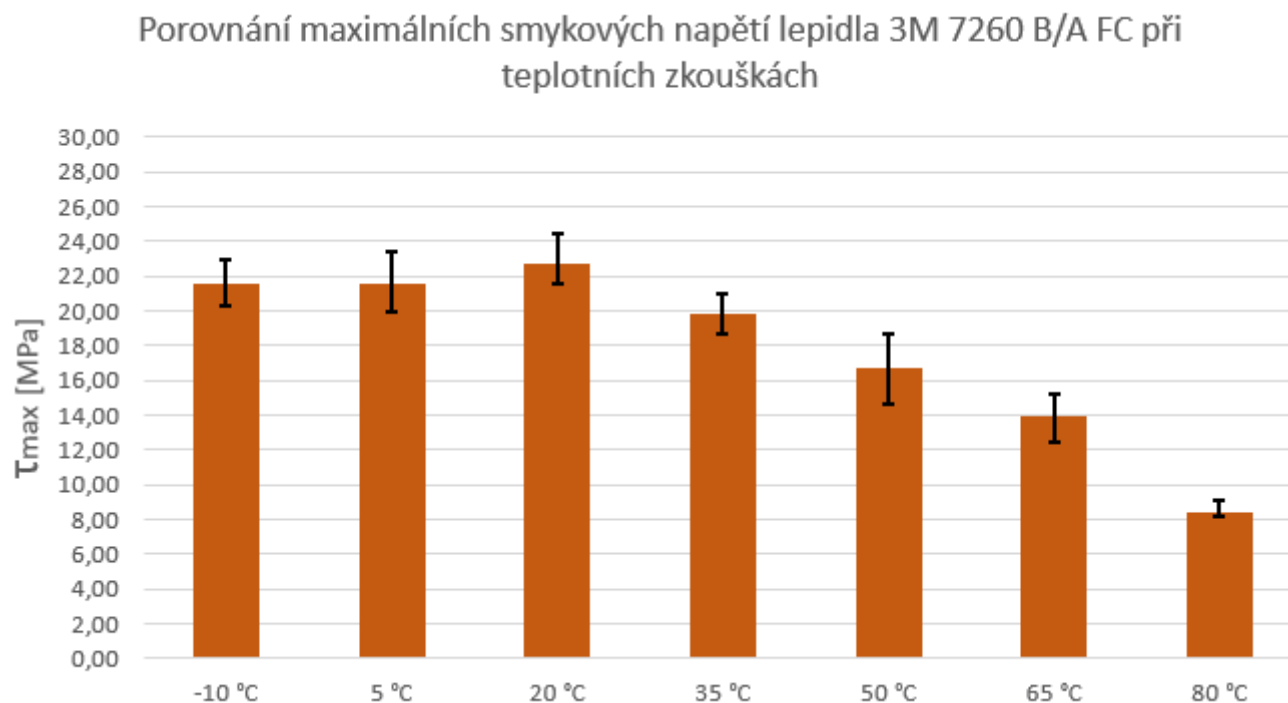
8.1.8. Shrnutí výsledků teplotních zkoušek lepidla 3M 7260 B/A FC



Obr. 8.26: Porovnání výsledků testů lepidla 3M 7260 B/A FC

Tab. 8.8: Porovnání naměřených hodnot tahových zkoušek lepidla 3M 7260 B/A FC

	-10 °C	5 °C	20 °C	35 °C	50 °C	65 °C	80 °C
F_{max} [N]	6464,92 ±314,99	6472,49 ±347,29	6832,8 ±323,7	5956,75 ±270,79	5023,35 ±473,38	4195,11 ±310,49	2534,18 ±102,89
τ_{max} [MPa]	21,55 ±1,06	21,57 ±1,16	22,78 ±1,08	19,86 ±0,9	16,76 ±1,58	13,98 ±1,03	8,45 ±0,34
Δl [mm]	0,82 ±0,08	1,16 ±0,16	1,37 ±0,14	1,17 ±0,08	0,94 ±0,18	0,56 ±0,06	0,42 ±0,044

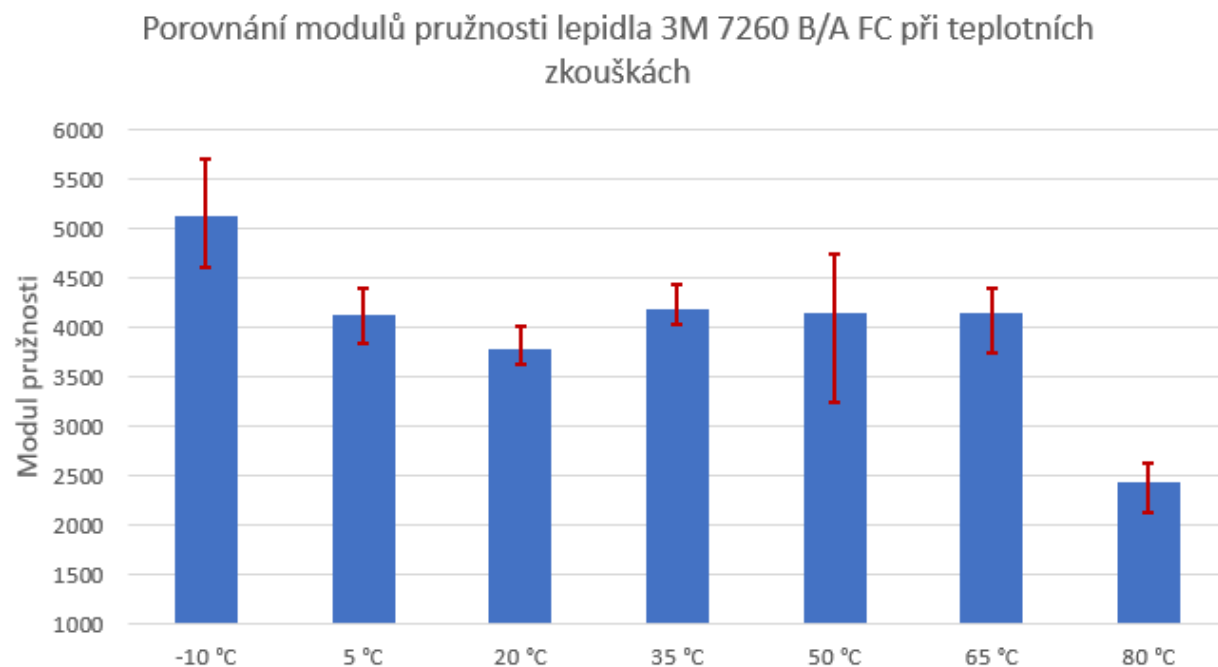


Obr. 8.27: Porovnání maximálních smykových napětí lepidla 3M 7260 B/A FC při teplotních zkouškách

Tab. 8.9: Porovnání maximálních smykových napětí lepidla 3M 7260 B/A FC při teplotních zkouškách

	-10 °C	5 °C	20 °C	35 °C	50 °C	65 °C	80 °C
τ_{\max} [MPa]	21,55 ±1,06	21,57 ±1,16	22,78 ±1,08	19,86 ±0,9	16,76 ±1,58	13,98 ±1,03	8,45 ±0,34

Dle očekávání nejvyšší smykovou pevnost vykazovaly vzorky při teplotě 20 °C. Snížením teploty klesla smyková pevnost pouze o minimum. Zvyšováním teploty smyková pevnost postupně klesala. Nejnižší smyková pevnost spoje byla změřena u vzorků při teplotě 80 °C. Smyková pevnost spoje této sady vzorků byla pouhých 8,45 MPa, což značí pokles pevnosti o 62,9 % v porovnání se vzorky při pokojové teplotě.



Obr. 8.28: Porovnání modulů pružnosti lepidla 3M 7260 B/A FC při teplotních zkouškách

Tab. 8.10: Porovnání modulů pružnosti lepidla 3M 7260 B/A FC při teplotních

	-10 °C	5 °C	20 °C	35 °C	50 °C	65 °C	80 °C
E [MPa]	5143,69 ±463,39	4127,07 ±211,82	3791,64 ±134,15	4191,83 ±162,78	4154,89 ±521,25	4162,74 ±250,53	2449,85 ±184,66

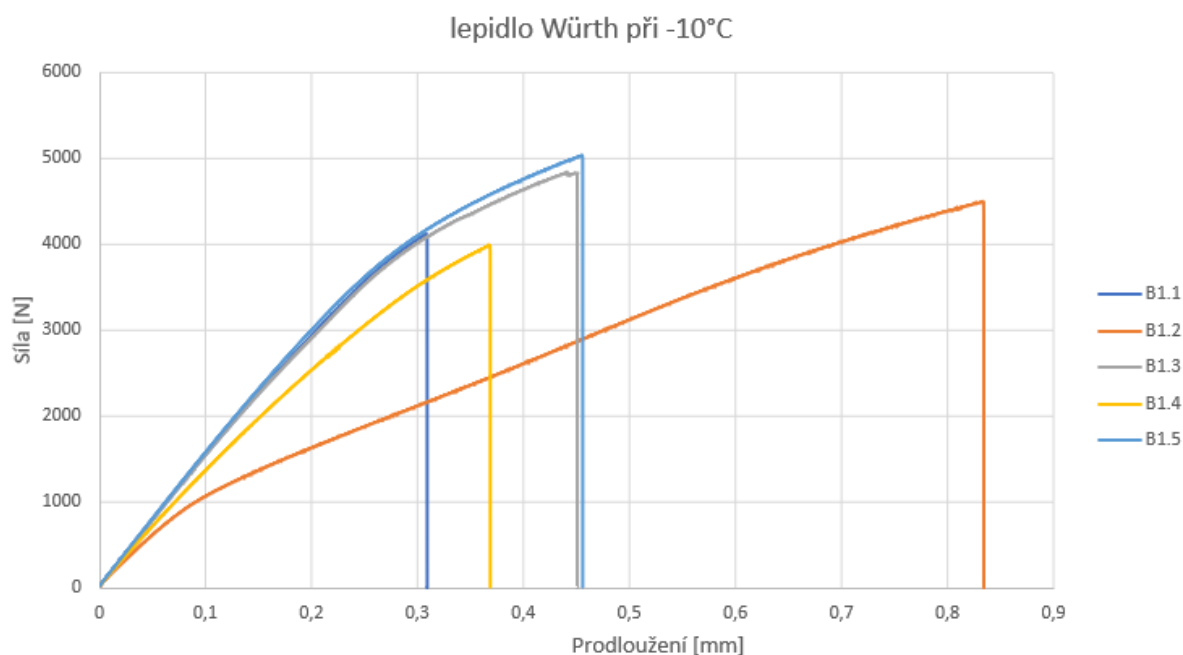
Jednoznačně nejvyšší modul pružnosti byl naměřen u vzorků při teplotě -10 °C. Zvyšováním teploty postupně klesal modul pružnosti až do hodnoty 3791,64 MPa při teplotě 20 °C. Při teplotě 35 °C se zvýšil modul pružnosti na 4191,83 MPa a srovnatelný modul pružnosti vydržel až do teploty 65 °C. Na teplotě 80 °C modul pružnosti prudce klesl na 2449,85 MPa.

8.2. Teplotní zkoušky lepidla Würth POWERBOND

V druhé části zkoušení pevnosti lepených spojů v závislosti na teplotě bylo použito vysokopevnostní dvousložkové lepidlo Würth POWERBOND, dále značeno jako lepidlo B. Detailní výpis vlastností tohoto lepidla je k uveden v technickém listu viz příloha č. 7.

8.2.1. Lepidlo B při -10 °C

Následující hodnoty vypovídají o chování lepidla B při teplotě -10 °C.

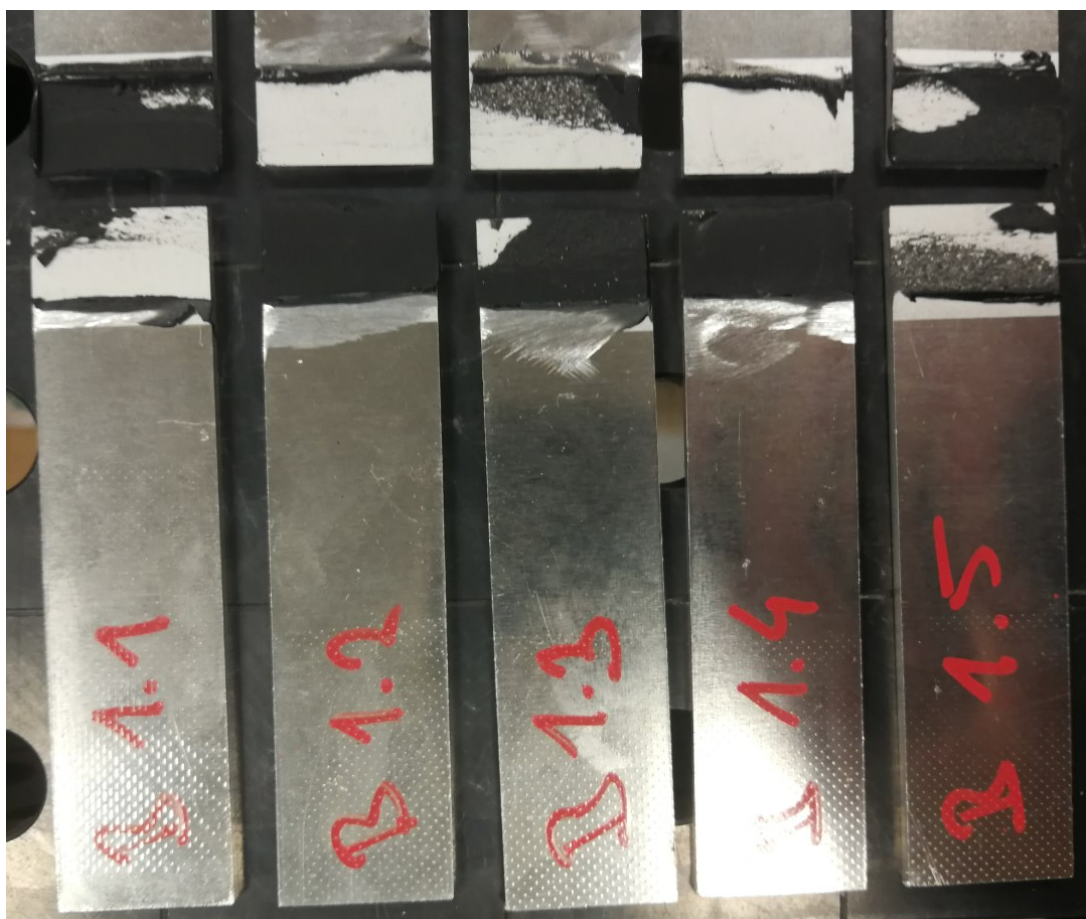


Obr. 8.29: Tahové zkoušky lepených spojů B1 při -10 °C

Tab. 8.11: Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů B1 při -10 °C

	B1.1	B1.2	B1.3	B1.4	B1.5	\bar{x}
F_{\max} [N]	4113,73	4491,82	4835,40	3986,73	5032,54	4492,04 \pm 402,12
τ_{\max} [MPa]	13,71	14,97	16,12	13,29	16,78	14,97 \pm 1,34
Δl [mm]	0,31	0,83	0,44	0,37	0,46	0,48 \pm 0,18
E [MPa]	5239,03	3663,84	5239,03	4664,72	5336,89	4828,70 \pm 629,09

Vzorky lepidla B nečekaně vykazovaly rozdílné výsledky. Vysoké prodloužení u vzorku B1.2 bylo pravděpodobně způsobeno nedostatečně silným upnutím vzorku a posunutím vzorku v čelistech během zkoušky. Byla naměřena průměrná pevnost lepidla 14,97 MPa a průměrné prodloužení 0,48 mm.



Obr. 8.30: Porušení lepených spojů B1 při -10 °C

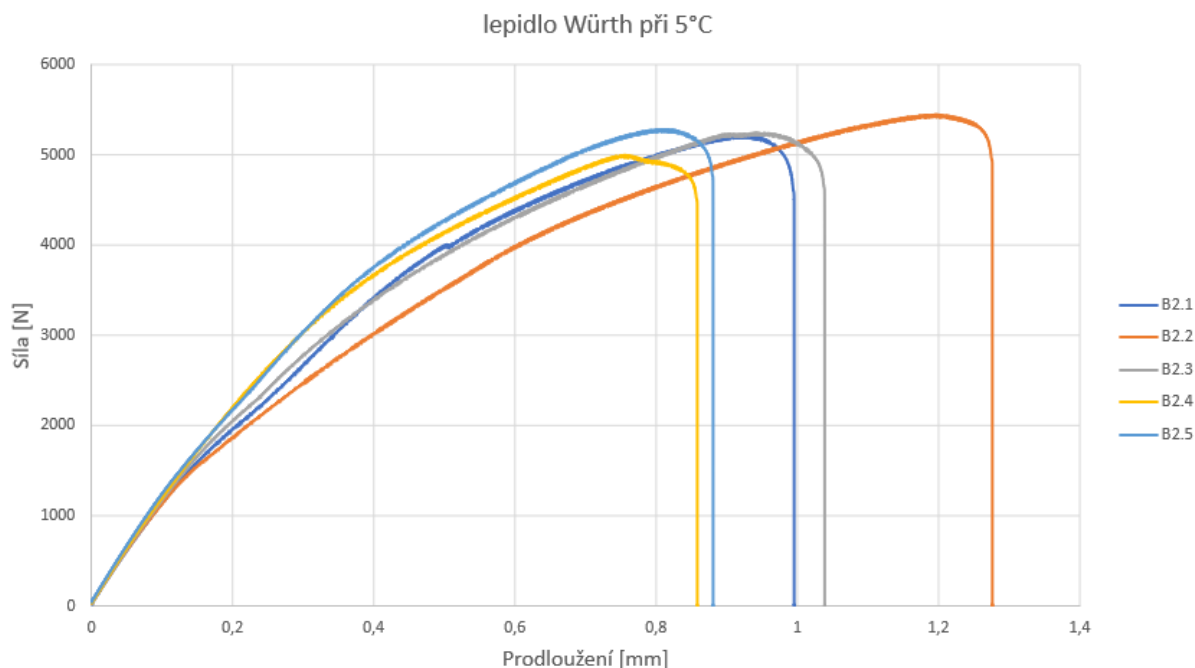
Vzorky sady B1 selhaly většinou důsledkem adhezivního porušení (AF). U vzorků B1.3 a B1.5 se vyskytlo částečné speciální kohezní porušení (SCF), viz obr. 8.30.



Obr. 8.31: Ohnutí lepeného spoje B1 při teplotě -10 °C

8.2.2. Lepidlo B při 5 °C

Následující hodnoty vypovídají o chování lepidla B při teplotě 5 °C.

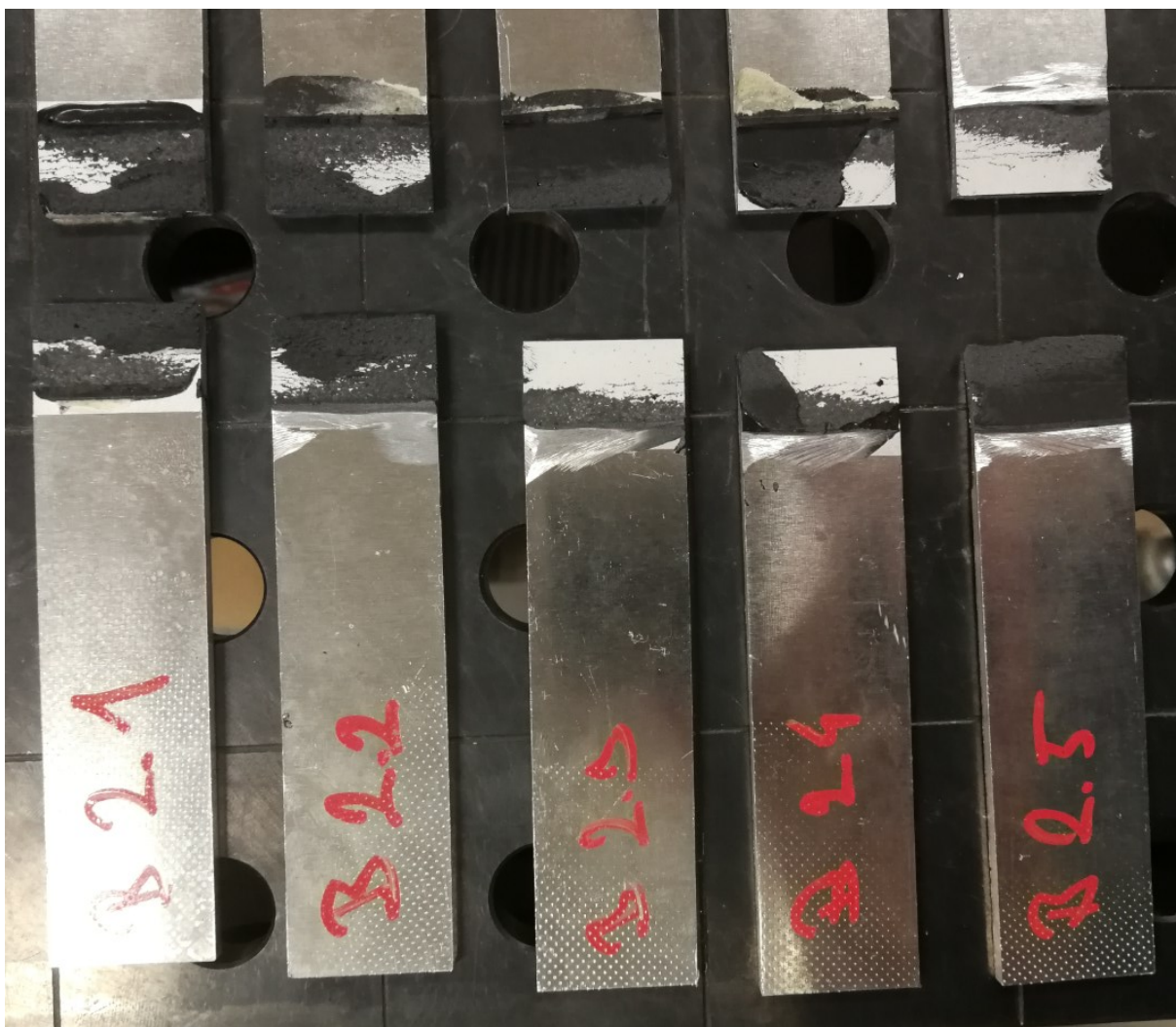


Obr. 8.32: Tahové zkoušky lepených spojů B2 při 5 °C

Tab. 8.12: Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů B2 při 5 °C

	B2.1	B2.2	B2.3	B2.4	B2.5	\bar{x}
F_{\max} [N]	5199,96	5432,76	5229,7	4984,09	5269,46	5223,19 \pm 144,09
τ_{\max} [MPa]	17,33	18,11	17,43	16,61	17,56	17,41 \pm 0,48
Δl [mm]	0,92	1,20	0,94	0,75	0,81	0,92 \pm 0,15
E [MPa]	3856,35	3841,54	3970,22	4066,07	4102,09	3967,26 \pm 105,89

Téměř všechny vzorky měly poměrně srovnatelný průběh a výsledky zkoušky. Byla naměřena průměrná pevnost lepidla 17,41 MPa a průměrné prodloužení 0,92 mm. Změřené hodnoty jsou téměř identické zkouškám při pokojové teplotě, z čehož plyne, že i s lehkým ochlazením lepidlo dosahuje svého maximálního potenciálu.



Obr. 8.33: Porušení lepených spojů B2 při 5 °C

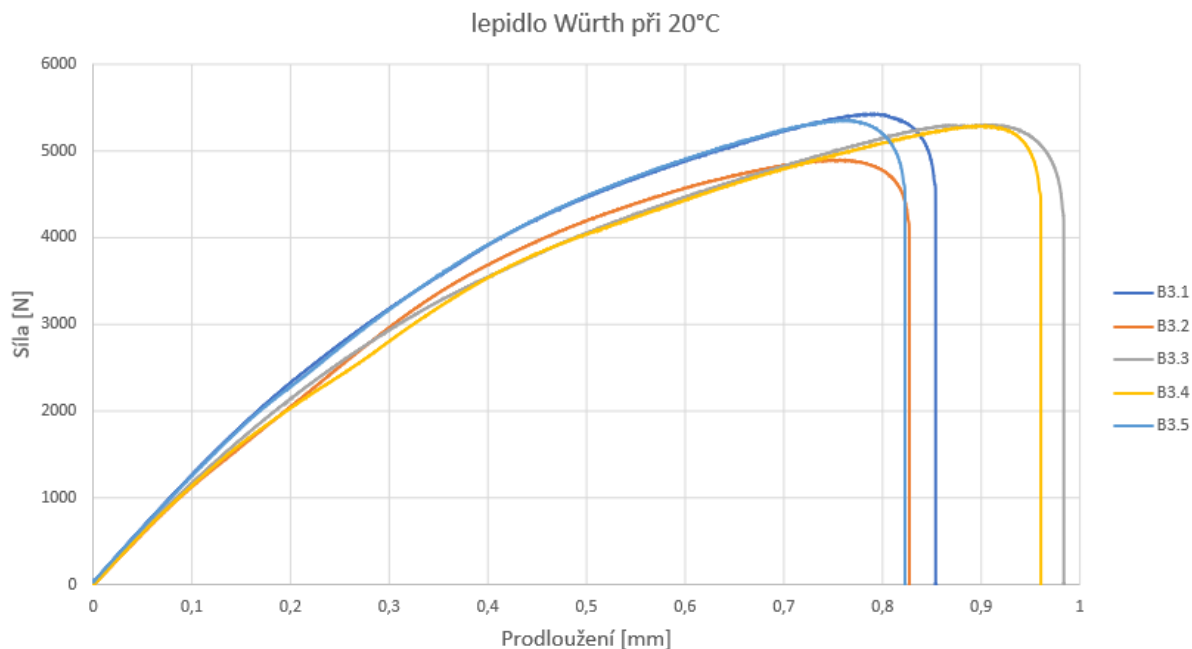
Selhání vzorků sady B2 byla kombinace adhezivního porušení (AF) a speciálního kohezní porušení (SCF), viz obr. 8.33



Obr. 8.34: Ohnutí lepeného spoje B2 při teplotě 5 °C

8.2.3. Lepidlo B při 20 °C

Následující hodnoty vypovídají o chování lepidla B při teplotě 20 °C.



Obr. 8.35: Tahové zkoušky lepených spojů B3 při 20 °C

Tab. 8.13: Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů B3 při 20 °C

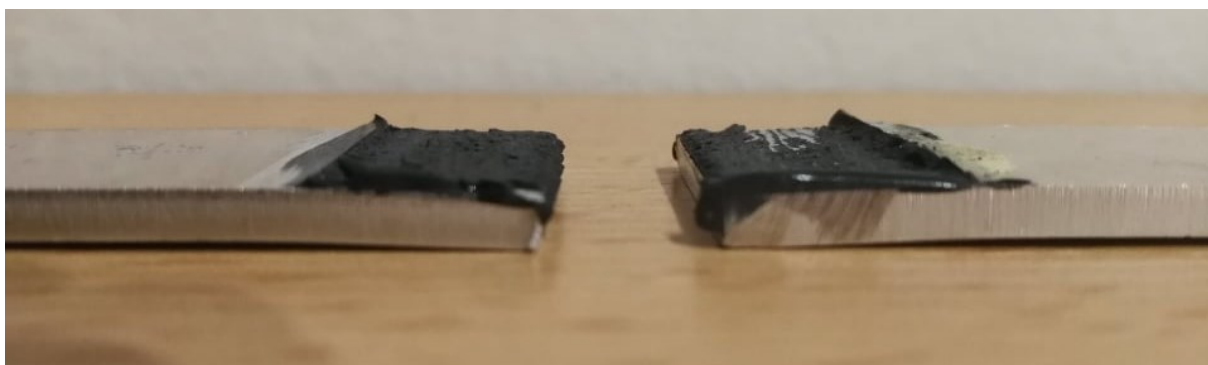
	B3.1	B3.2	B3.3	B3.4	B3.5	\bar{x}
F_{\max} [N]	5422,31	4890,87	5293,53	5283,69	5349,22	5247,93 \pm 185,21
τ_{\max} [MPa]	18,07	16,30	17,65	17,61	17,83	17,49 \pm 0,62
Δl [mm]	0,79	0,76	0,91	0,90	0,76	0,82 \pm 0,07
E [MPa]	4286,1	3804,09	3955,5	3841,54	4231,68	4023,78 \pm 199,08

Vzorky měly srovnatelný charakter průběhu a srovnatelné výsledky zkoušky. Průměrná pevnost lepidla A při pokojové teplotě byla naměřena na 17,49 MPa a průměrné prodloužení 0,82 mm.



Obr. 8.36: Porušení lepených spojů B3 při 20 °C

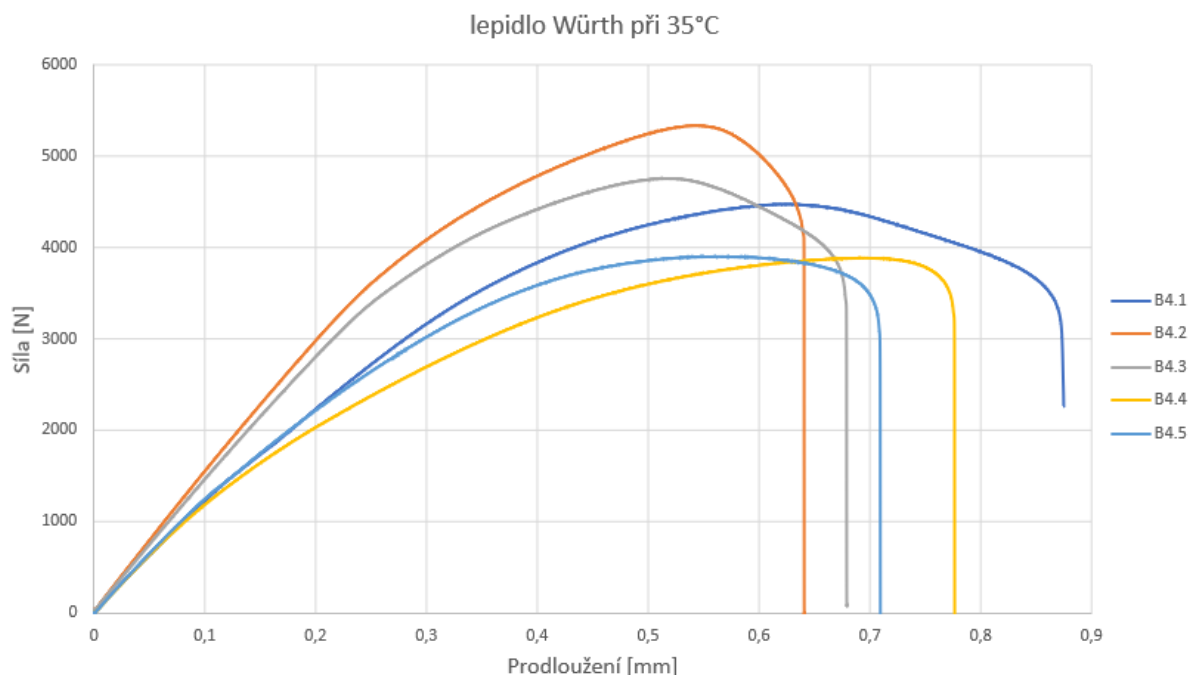
K selhání vzorků sady B3 došlo na rozhraní adherentu a lepidla, ale nikoliv uprostřed. Jedná se o speciální kohezní porušení (SCF) a v praxi jde o nejběžnější jev porušení, viz obr. 8.36.



Obr. 8.37: Ohnutí lepeného spoje B1 při teplotě -10 °C

8.2.4. Lepidlo B při 35 °C

Následující hodnoty vypovídají o chování lepidla B při teplotě 35 °C.



Obr. 8.38: Tahové zkoušky lepených spojů B4 při 35 °C

Tab. 8.14: Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů B4 při 35 °C

	B4.1	B4.2	B4.3	B4.4	B4.5	\bar{x}
F_{\max} [N]	4470,82	5332,63	4754,50	3883,78	3899,77	4468,3 ±546,6
τ_{\max} [MPa]	14,90	17,78	15,85	12,95	13,00	14,89 ±1,82
Δl [mm]	0,6236	0,54265	0,51794	0,69563	0,56348	0,59 ±0,06
E [MPa]	4126,9	5237,32	4939,8	4043,47	4240,66	4517,63 ±479,66

Vzorky při zvýšené teplotě vykazovaly značně nekonzistentní výsledky. U lepidla B se jevilo udržení konzistentní teploty jako velice problematické, a to mohlo způsobit vzniklé nepřesnosti měření. Můžeme si všimnout, že už mírně zvýšená teplota má vliv na vlastnosti spoje. Byla naměřena průměrná pevnost lepidla 14,89 MPa, což je o 14,9 % méně než při pokojové teplotě. Prodloužení se také snížilo. Naměřeno bylo průměrné prodloužení 0,59 mm, což je o 28 % méně než při pokojové teplotě.



Obr. 8.39: Porušení lepených spojů B4 při 35 °C

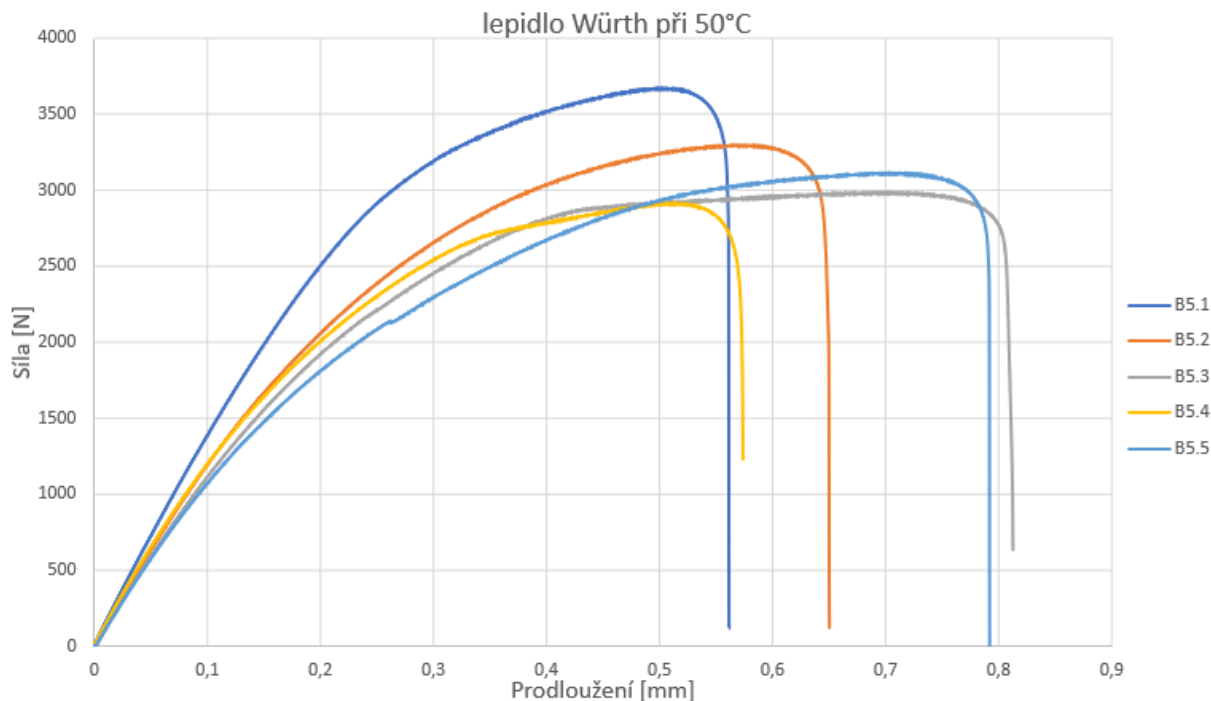
Všechny vzorky ze sady B4 selhaly důsledkem kohezního porušení (CF), viz obr. 8.39.



Obr. 8.40: Ohnutí lepeného spoje B4 při teplotě 35 °C

8.2.5. Lepidlo B při 50 °C

Následující hodnoty vypovídají o chování lepidla B při teplotě 50 °C.



Obr. 8.41: Tahové zkoušky lepených spojů B5 při 50 °C

Tab. 8.15: Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů B5 při 50 °C

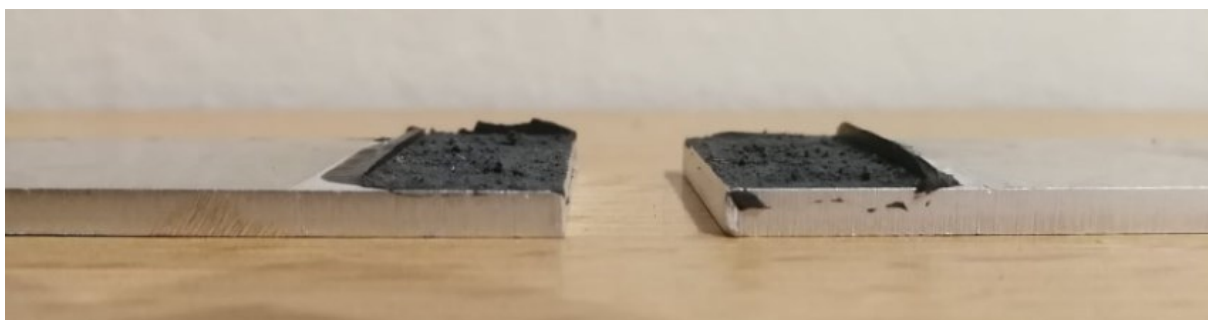
	B5.1	B5.2	B5.3	B5.4	B5.5	\bar{x}
F_{\max} [N]	3666,71	3292,07	2979,97	2909,02	3108,84	$3191,32 \pm 271,04$
τ_{\max} [MPa]	12,22	10,97	9,93	9,70	10,36	$10,64 \pm 0,9$
Δl [mm]	0,50	0,57	0,70	0,51	0,70	$0,6 \pm 0,09$
E [MPa]	4754,83	4066,07	3762,05	4126,9	3612,55	$4064,48 \pm 394$

Vzorky při zvýšené teplotě nadále vykazovaly značně nekonzistentní výsledky. Se zvyšující se teplotou měření ukazuje další snížení pevnosti spoje oproti předchozímu testu. Byla naměřena průměrná pevnost lepidla 10,64 MPa, což je o 39,2 % méně než při pokojové teplotě. Průměrné prodloužení ovšem zůstalo podobné s předchozím testem. Průměrné prodloužení bylo změřeno na 0,60 mm, což je o 26,8 % méně než při pokojové teplotě.



Obr. 8.42: Porušení lepených spojů B5 při 50 °C

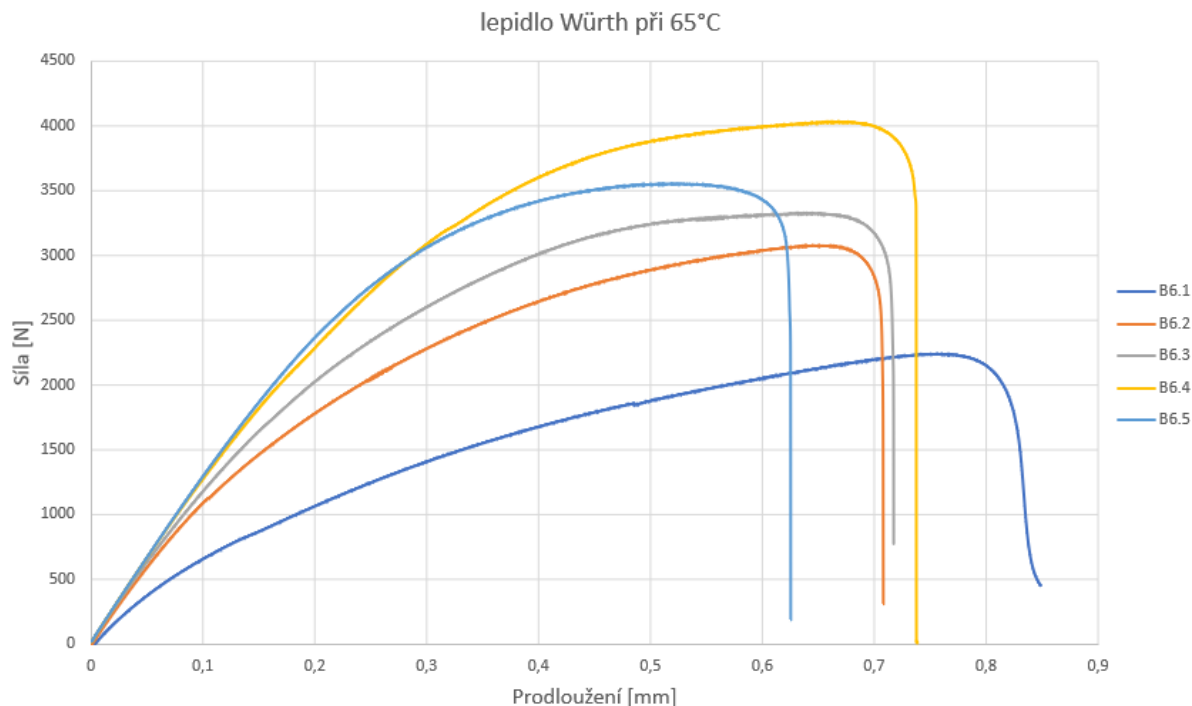
Všechny vzorky ze sady B5 selhaly důsledkem kohezního porušení (CF), viz obr. 8.42



Obr. 8.43: Ohnutí lepeného spoje B5 při teplotě 50 °C

8.2.6. Lepidlo B při 65 °C

Následující hodnoty vypovídají o chování lepidla B při teplotě 65 °C.



Obr. 8.44: Tahové zkoušky lepených spojů B6 při 65 °C

Tab. 8.16: Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů B6 při 65 °C

	B6.1	B6.2	B6.3	B6.4	B6.5	\bar{x}
F_{max} [N]	2238,00	3075,58	3322,98	4030,51	3551,74	3243,76 ±593,29
τ_{max} [MPa]	7,46	10,25	11,08	13,44	11,84	10,81 ±1,98
Δl [mm]	0,76	0,65	0,64	0,67	0,52	0,65 ±0,075
E [MPa]	1814,88	3692,59	4019,09	4341,93	4378,76	3649,45 ±950,32

Nekonzistentní výsledky se ukázaly také u vzorků zatěžovaných teplotou 65 °C. Překvapivě vzorky B6 vykazovaly porovnatelné výsledky se vzorky B5, které byly zatěžovány teplotou 50 °C. Byla naměřena průměrná pevnost lepidla 10,81 MPa, což je o 38,2 % méně než při pokojové teplotě a průměrné prodloužení bylo změřeno na 0,65 mm, což je o 20,7 % méně než při pokojové teplotě.



Obr. 8.45: Porušení lepených spojů B6 při 65 °C

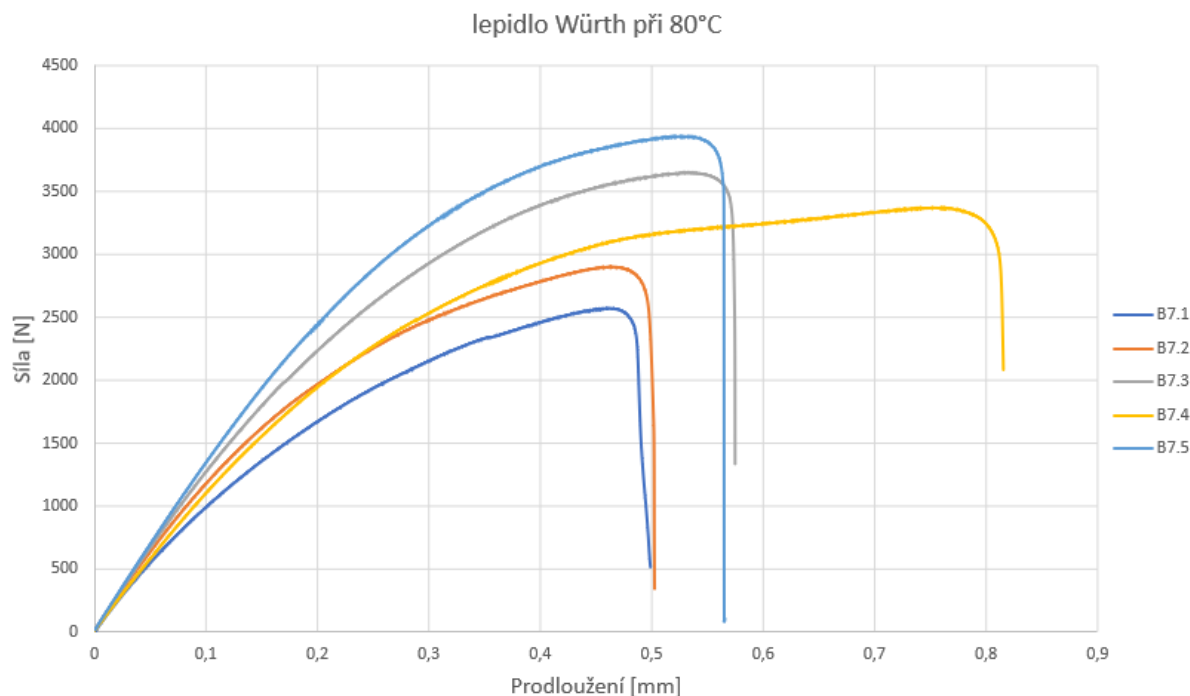
Selhání vzorků sady B6 byla kombinace kohezního porušení (CF) a speciálního kohezní porušení (SCF), viz obr. 8.45



Obr. 8.46: Ohnutí lepeného spoje B6 při teplotě 65 °C

8.2.7. Lepidlo B při 80 °C

Následující hodnoty vypovídají o chování lepidla B při teplotě 80 °C.

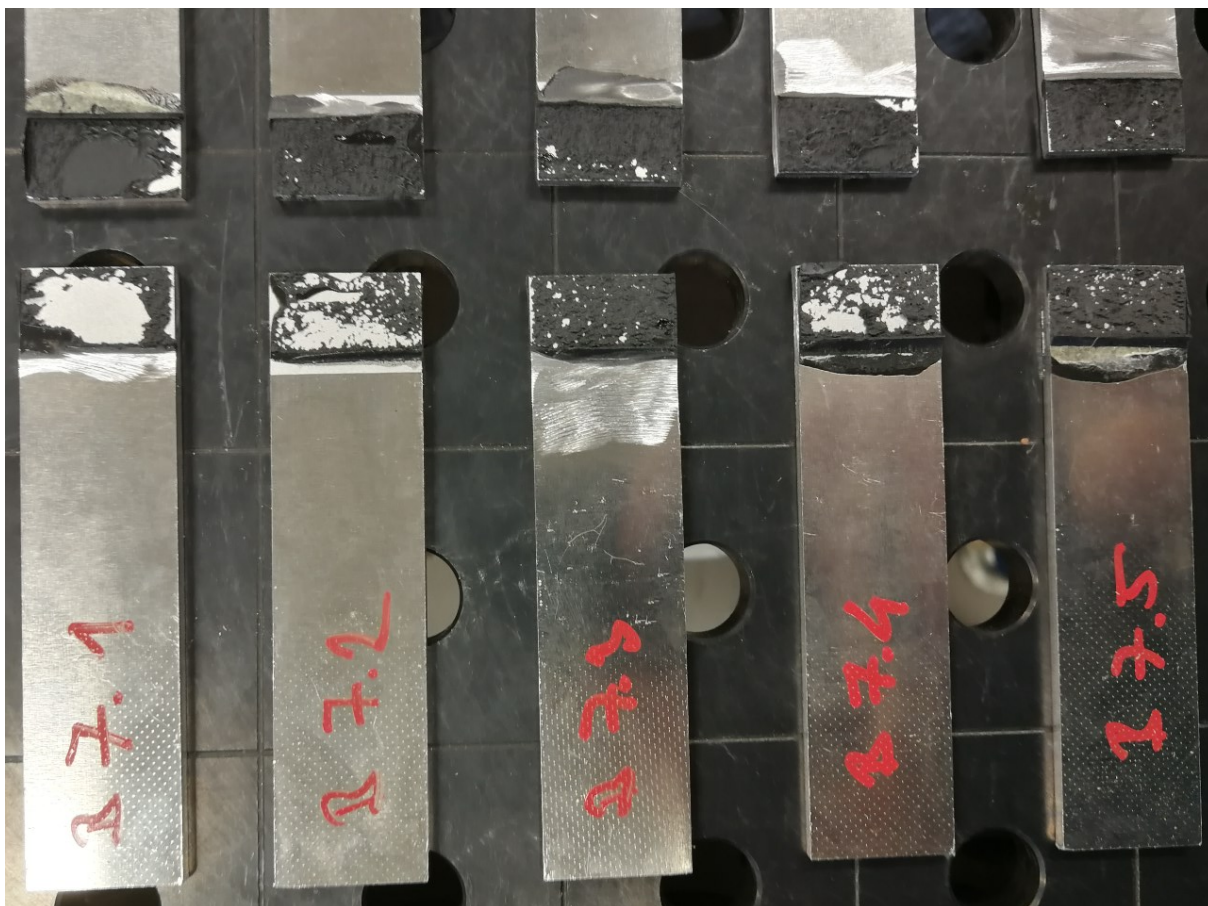


Obr. 8.47: Tahové zkoušky lepených spojů B7 při 80 °C

Tab. 8.17: Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů B7 při 80 °C

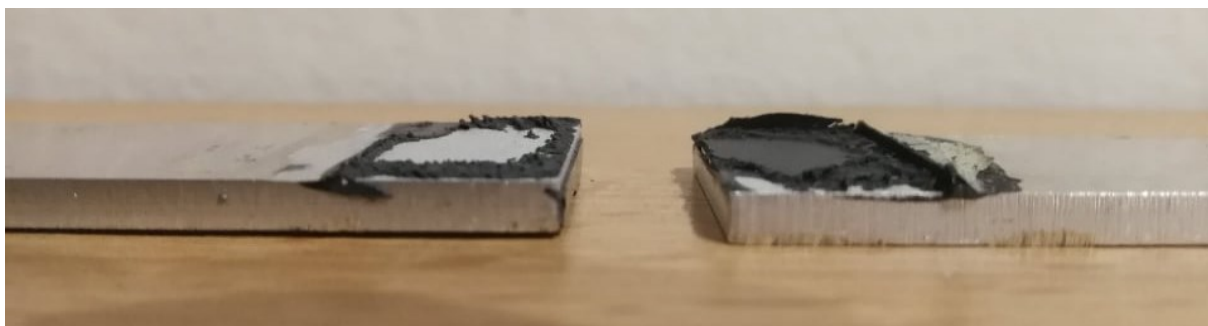
	B7.1	B7.2	B7.3	B7.4	B7.5	\bar{x}
F_{max} [N]	2569,49	2899,82	3646,60	3369,43	3936,44	3284,36 ±494,48
τ_{max} [MPa]	8,56	9,67	12,16	11,23	13,12	10,95 ±1,65
Δl [mm]	0,46	0,46	0,53	0,75	0,53	0,55 ±0,11
E [MPa]	3290,83	4035,31	4350,19	3712,3	4568,82	3991,49 ±454,48

I vzorky B7 vykazovaly značně nekonzistentní výsledky. U vzorků B7 sledujeme srovnatelnou pevnost s předchozími dvěma sadami vzorků. Byla naměřena průměrná pevnost lepidla 10,95 MPa, což je o 37,4 % méně než při pokojové teplotě. Ovšem průměrné prodloužení se snížilo. Bylo změřeno na 0,55 mm, což je o 32,9 % méně než při pokojové teplotě.



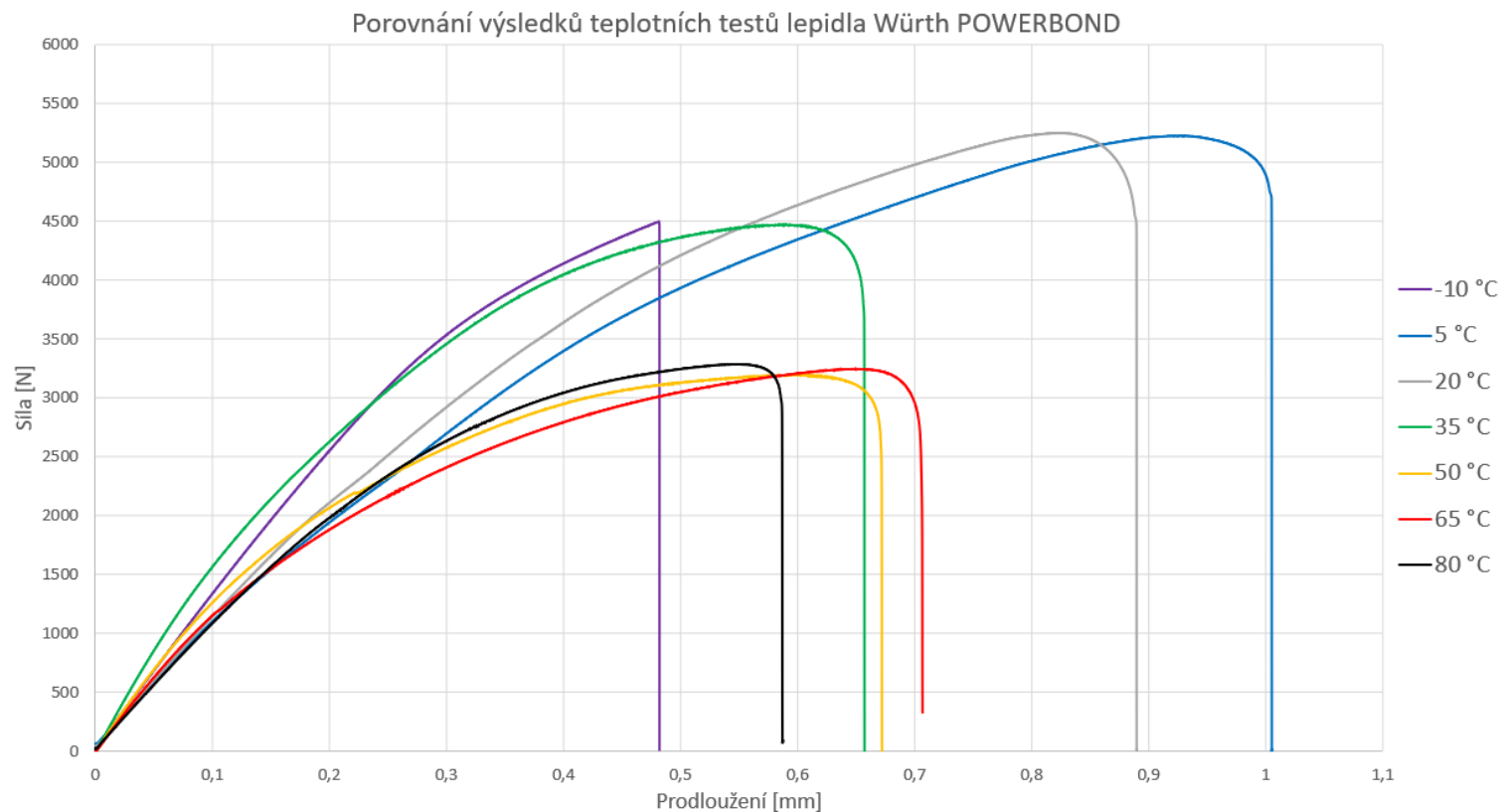
Obr. 8.48: Porušení lepených spojů B7 při 80 °C

Selhání vzorků sady B7 byla z většiny kombinace kohezního porušení (CF) a speciálního kohezního porušení (SCF). Pouze selhání vzorku B7.1 byla kombinace adhezivního porušení (AF) a speciálního kohezního porušení (SCF), viz obr. 8.48



Obr. 8.49: Ohnutí lepeného spoje B7 při teplotě 80 °C

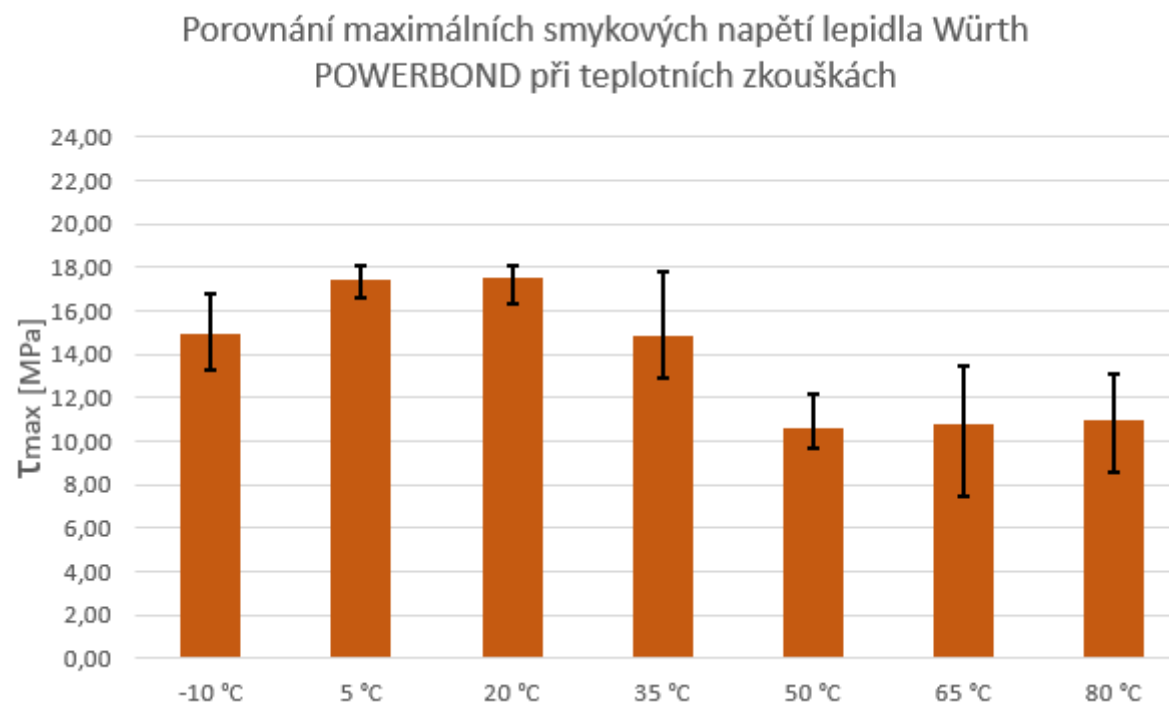
8.2.8. Shrnutí výsledků teplotních zkoušek lepidla Würth POWERBOND



Obr. 8.50: Porovnání výsledků teplotních testů lepidla Würth POWERBOND

Tab. 8.18: Porovnání naměřených hodnoty tahových zkoušek lepidla Würth POWERBOND

	-10 °C	5 °C	20 °C	35 °C	50 °C	65 °C	80 °C
F_{max} [N]	4492,04 ±402,12	5223,19 ±144,09	5247,93 ±185,21	4468,3 ±546,6	3191,32 ±271,04	3243,76 ±593,29	3284,36 ±494,48
τ_{max} [MPa]	14,97 ±1,34	17,41 ±0,48	17,49 ±0,62	14,89 ±1,82	10,64 ±0,9	10,81 ±1,98	10,95 ±1,65
Δl [mm]	0,48 ±0,18	0,92 ±0,15	0,82 ±0,07	0,59 ±0,06	0,6 ±0,09	0,65 ±0,075	0,55 ±0,11



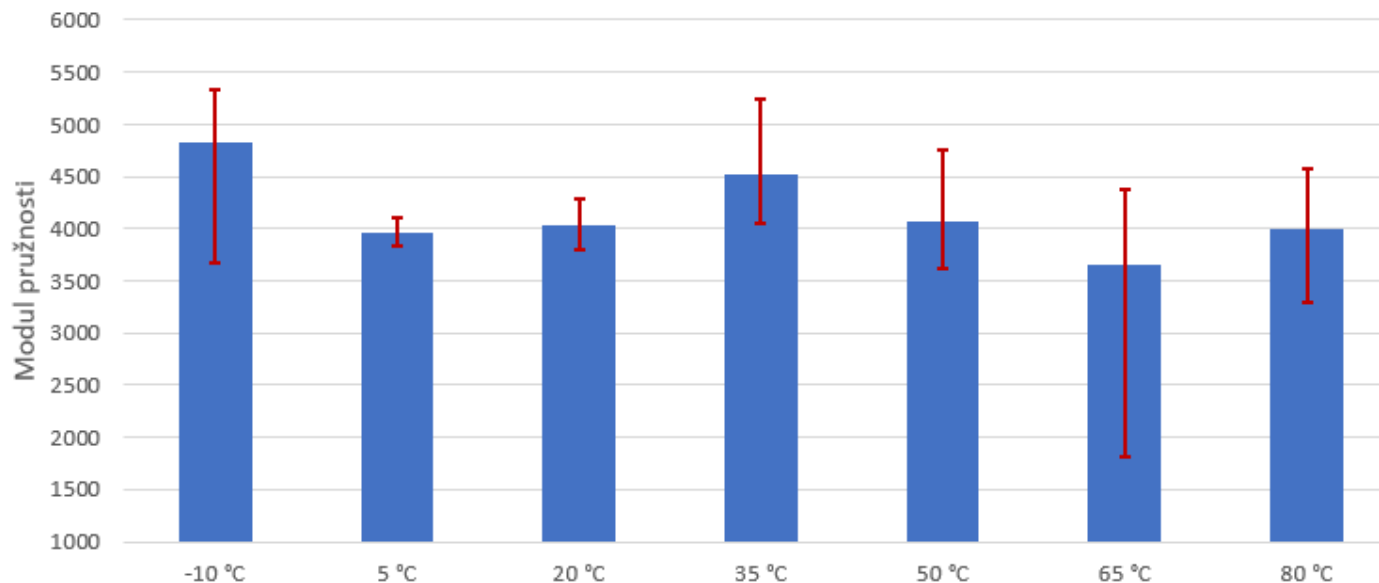
Obr. 8.51: Porovnání maximálních smykových napětí lepidla Würth POWERBOND při teplotních

Tab. 8.19: Porovnání maximálních smykových napětí lepidla Würth POWERBOND při teplotních

	-10 °C	5 °C	20 °C	35 °C	50 °C	65 °C	80 °C
τ_{\max} [MPa]	14,97 ±1,34	17,41 ±0,48	17,49 ±0,62	14,89 ±1,82	10,64 ±0,9	10,81 ±1,98	10,95 ±1,65

Dle očekávání nejvyšší smykovou pevnost vykazovaly vzorky při teplotě 20 °C. Vzorky při teplotě 5 °C si stále udržely srovnatelnou pevnost se vzorky vystavenými pokojové teplotě. Ochlazováním do minusových teplot bylo patrné klesání smykové pevnosti. Při zvyšování teploty smyková pevnost postupně klesala. Na teplotě 50 °C nastalo ustálení pevnosti na 10,64 MPa a podobnou pevnost si nesly vzorky až do teploty 80 °C.

Porovnání modulů pružnosti lepidla Würth POWERBOND při teplotních zkouškách



Obr. 8.52: Porovnání modulů pružnosti lepidla Würth POWERBOND při teplotních zkouškách

Tab. 8.20: Porovnání modulů pružnosti lepidla Würth POWERBOND při teplotních zkouškách

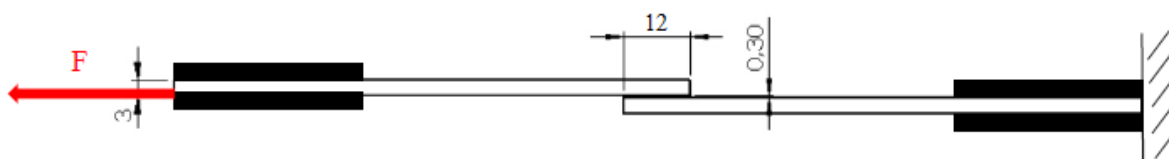
	-10 °C	5 °C	20 °C	35 °C	50 °C	65 °C	80 °C
E [MPa]	4828,70 ±629,09	3967,26 ±105,89	4023,78 ±199,08	4517,63 ±479,66	4064,48 ±394	3649,45 ±950,32	3991,49 ±454,48

Nejvyšší modul pružnosti byl naměřen u vzorků při teplotě -10 °C. Dále následoval prudký pokles modulu pružnosti na teplotě 5 °C. S plynulým stoupáním teploty do 35 °C se zároveň zvyšoval také modul pružnosti. Na teplotě 50 °C nastal pokles a ustálení modulu pružnosti na 4064 MPa a podobnou pevnost si nesly vzorky až do teploty 80 °C. Výkyv na teplotě 65 °C byl způsobený nejspíše nepřesností měření. Skutečná hodnota by dosahovala přibližně 4000 MPa.

9. Zkouška závislosti na vlhkosti prostředí

Cílem zkoušky bylo zjistit chování lepidla v prostředí třech různých vlhkostí. Jednotlivé sady vzorků o pěti kusech byly uloženy na 24 hodin do klimakomory o vlhkosti 40, 70 a 95 %. Vzorky následně podstoupily smykovou pevnostní zkoušku dle ČSN EN 1465 na trhačím stroji. Byly použity tři sady vzorků pro každé lepidlo. Součet činil 15 lepených spojů (30 kusů plechu).

Schéma zatížení lepeného spoje při smykové pevnostní zkoušce lze vidět na obr. 9.1.



Obr. 9.1: Schéma zatížení zkušebního vzorku upnutého v čelistech trhačího stroje

Stejně jako u zkoušek závislosti pevnosti spoje na teplotě byla k provedení experimentů použita klimakomora Tensile Test–Climate Chamber, TensileEvent firmy Weiss Technik a trhačí stroj SHIMADZU AGS-X.

Výstupem ze zkoušky je závislost síly na prodloužení vzorku. Ze zjištěné maximální síly a plochy lepeného spoje lze vypočítat smykové napětí dle následujícího vztahu:

$$\tau = \frac{F_{max}}{S} \quad (1)$$

τ – pevnost ve smyku [MPa],

F_{max} – maximální síla spoje [N],

S – plocha lepeného spoje [mm²].

Z vypočtených a změřených hodnot byl vypočten modul pružnosti. Je nezbytné, aby se modul pružnosti nacházel v platnosti Hookova zákona, proto se počítalo se silou 1000 N, viz následující vztah:

$$E = \frac{F_{1000}}{S} \cdot \frac{l_o}{\Delta l_{1000}} \quad (2)$$

E – modul pružnosti [MPa],

F_{1000} – síla v platnosti hookova zákona; zvolena na 1000 N [N],

Δl_{1000} – prodloužení vzorku při zátěži 1000 N [mm],

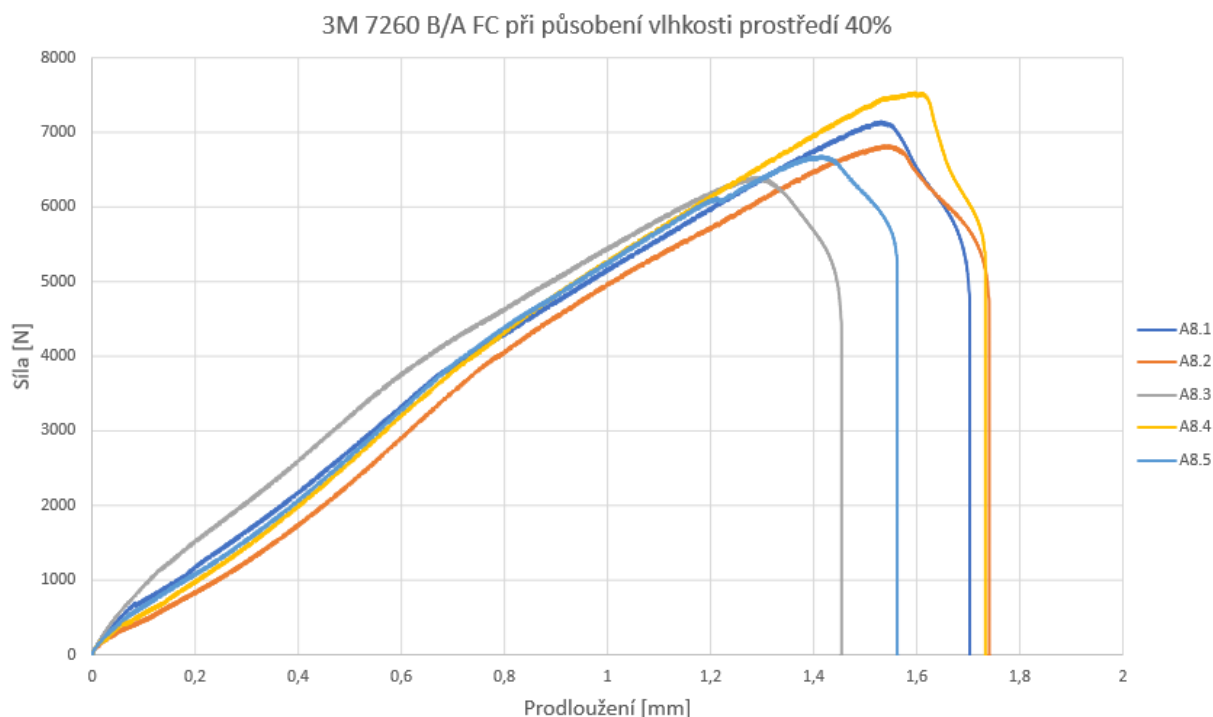
l_o – počáteční délka vzorku [mm].

9.1. Zkoušky závislosti pevnosti lepidla 3M 7260 B/A FC na vlhkosti prostředí

K první části zkoušení pevnosti lepených spojů v závislosti na vlhkosti prostředí bylo použito vysokopevnostní dvousložkové lepidlo 3M 7260 B/A FC, dále značeno jako lepidlo A. Detailní výpis vlastností tohoto lepidla je k dispozici v technickém listu viz příloha č. 4.

9.1.1. Lepidlo A při vlhkosti prostředí 40 %

Následující hodnoty vypovídají o chování lepidla A při působení vlhkosti prostředí 40 %.

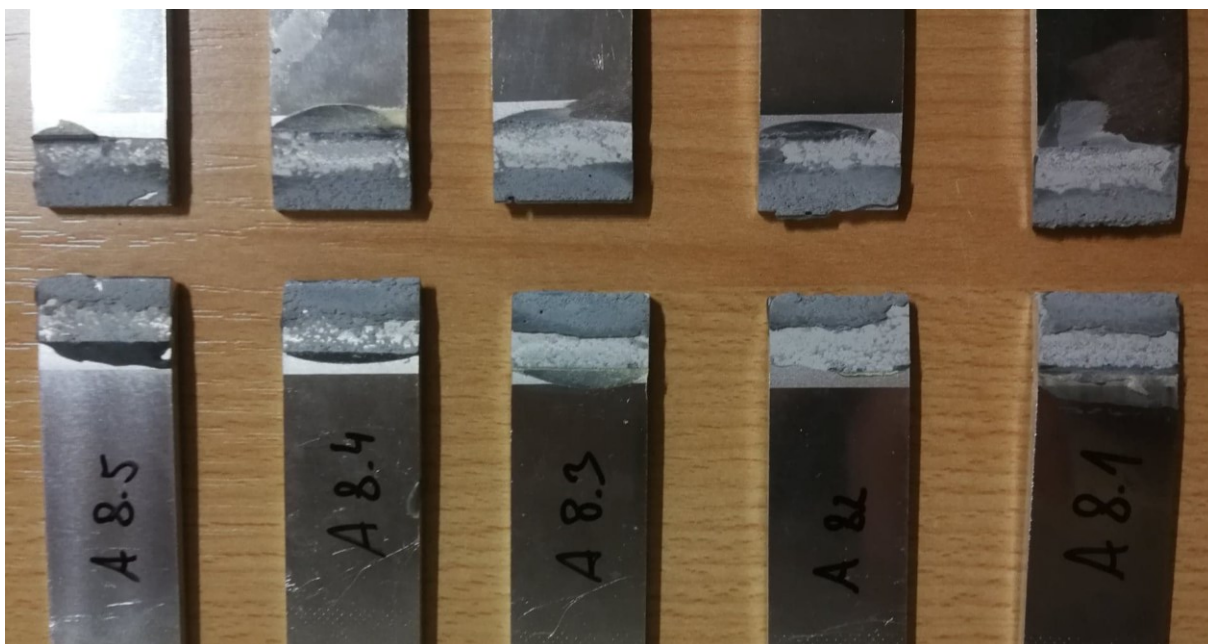


Obr. 9.2: Tahové zkoušky lepených spojů A8 při vlhkosti prostředí 40 %

Tab. 9.1: Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů A8 při vlhkosti prostředí 40 %

	A8.1	A8.2	A8.3	A8.4	A8.5	\bar{x}
F_{max} [N]	7126,78	6805,56	6376,39	7516,55	6662,50	6897,56 ±392,69
τ_{max} [MPa]	23,76	22,69	21,25	25,06	22,21	22,99 ±1,31
Δl [mm]	1,53	1,54	1,29	1,60	1,42	1,47 ±0,11
E [MPa]	1551,03	1469,45	1652,61	1569,93	1567,48	1562,1 ±58,29

Vzorky měly srovnatelný charakter průběhu a srovnatelné výsledky zkoušky. Průměrná pevnost lepidla A při působení vlhkosti prostředí 40 % byla naměřena na 22,99 MPa a průměrné prodloužení 1,47 mm.



Obr. 9.3: Porušení lepených spojů A8 při vlhkosti prostředí 40 %

K selhání vzorků sady A9 došlo důsledkem speciálního kohezního porušení (SCF), viz obr. 9.3.

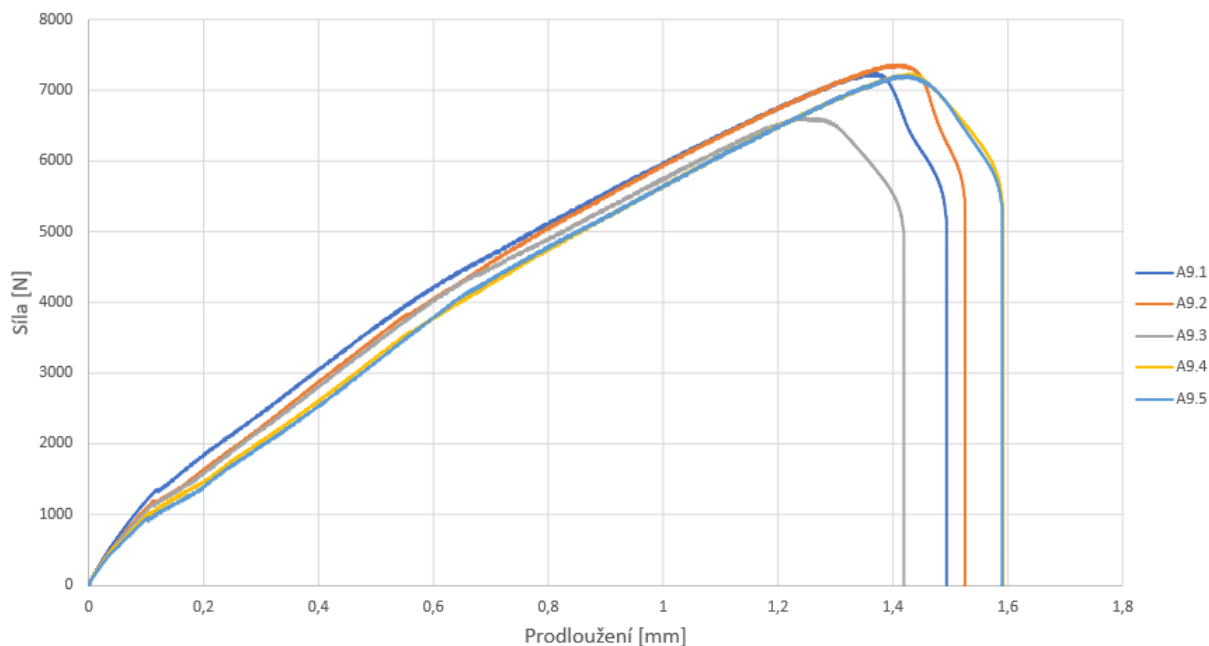


Obr. 9.4: Ohnutí lepeného spoje A8 při vlhkosti prostředí 40 %

9.1.2. Lepidlo A při vlhkosti prostředí 70 %

Následující hodnoty vypovídají o chování lepidla A při působení vlhkosti prostředí 70 %.

3M 7260 B/A FC při působení vlhkosti prostředí 70%

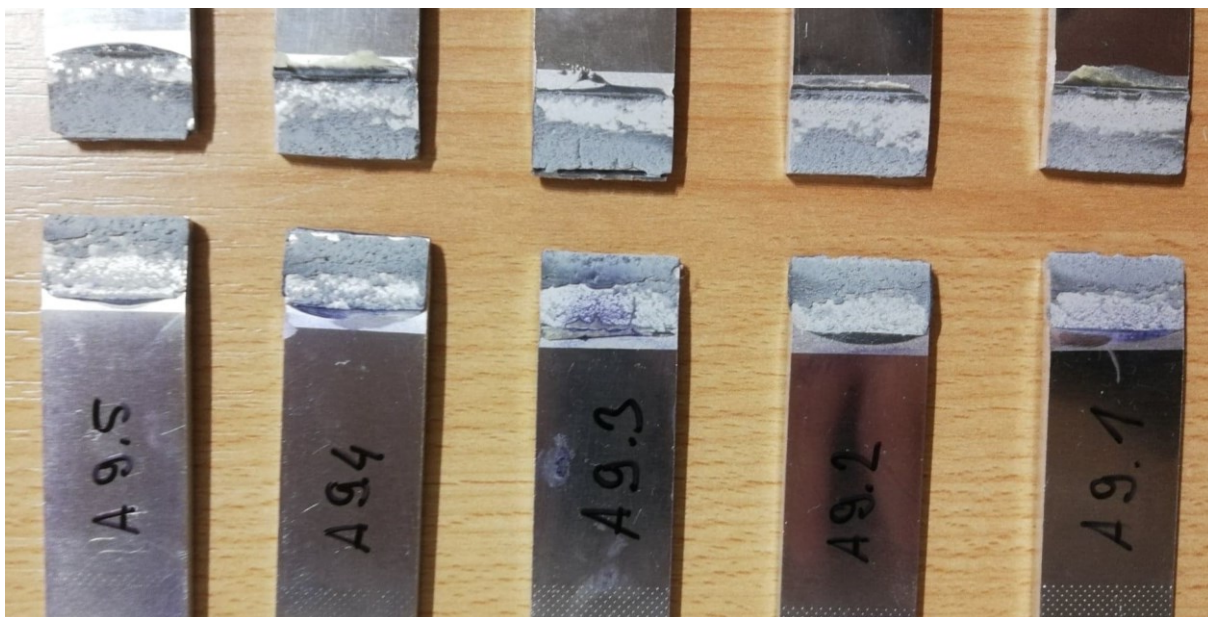


Obr. 9.5: Tahové zkoušky lepených spojů A9 při vlhkosti prostředí 70 %

Tab. 9.2: Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů A9 při vlhkosti prostředí 70 %

	A9.1	A9.2	A9.3	A9.4	A9.5	\bar{x}
F_{max} [N]	7220,28	7347,74	6604,06	7213,27	7190,78	7115,23 \pm 261,42
τ_{max} [MPa]	24,07	24,49	22,01	24,04	23,97	23,72 \pm 0,87
Δl [mm]	1,37	1,41	1,24	1,43	1,42	1,37 \pm 0,07
E [MPa]	1760,91	1738,54	1779,65	1684,41	1683,26	1729,35 \pm 39,38

Vzorky měly srovnatelný charakter průběhu a srovnatelné výsledky zkoušky. Zaznamenáváme lehce vyšší pevnost spoje než u předchozího testu. Průměrná pevnost lepidla A při působení vlhkosti prostředí 70 % byla naměřena na 23,72 MPa a průměrné prodloužení 1,37 mm.



Obr. 9.6: Porušení lepených spojů A9 při vlhkosti prostředí 70 %

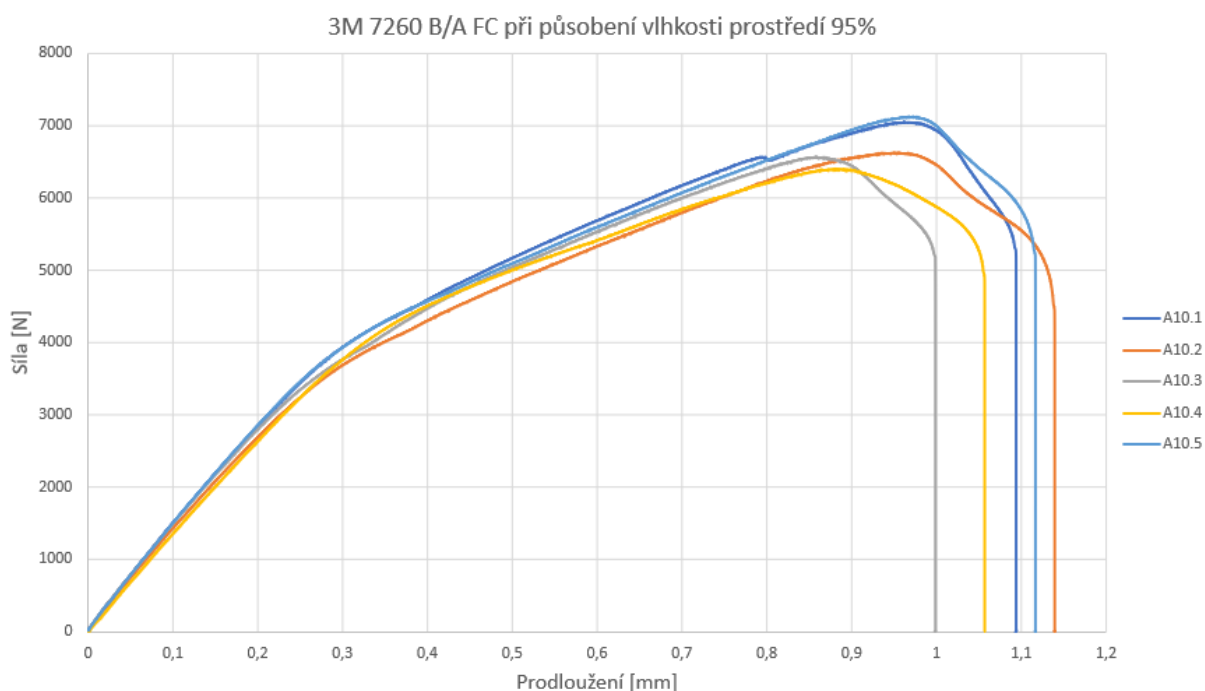
K selhání vzorků sady A9 došlo důsledkem speciálního kohezní porušení (SCF), viz obr. 9.6.



Obr. 9.7: Ohnutí lepeného spoje A9 při vlhkosti prostředí 70 %

9.1.3. Lepidlo A při vlhkosti prostředí 95 %

Následující hodnoty vypovídají o chování lepidla A při působení vlhkosti prostředí 95 %.

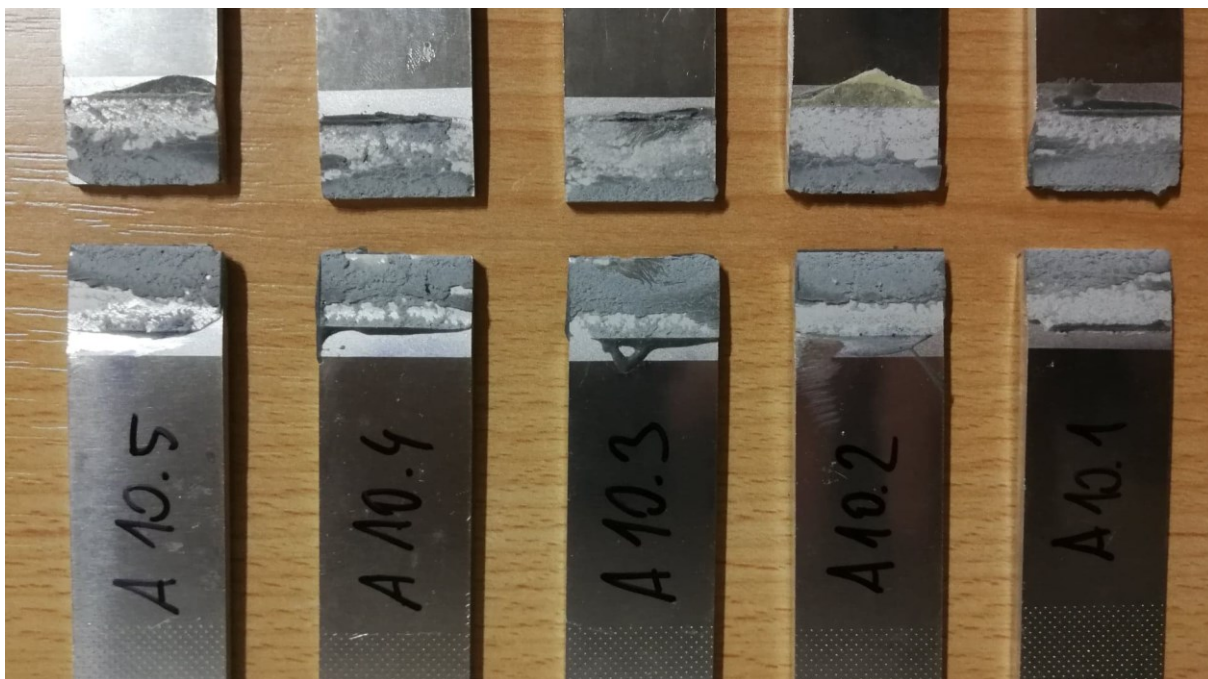


Obr. 9.8: Tahové zkoušky lepených spojů A10 při vlhkosti prostředí 95 %

Tab. 9.3: Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů A10 při vlhkosti prostředí 95 %

	A10.1	A10.2	A10.3	A10.4	A10.5	\bar{x}
F_{\max} [N]	7044,13	6619,76	6559,28	6393,56	7117,83	$6746,91 \pm 283,6$
τ_{\max} [MPa]	23,48	22,07	21,86	21,31	23,73	$22,49 \pm 0,95$
Δl [mm]	0,97	0,95	0,86	0,88	0,97	$0,93 \pm 0,05$
E [MPa]	2432,05	2316,32	2551,44	2410,56	2443,16	$2430,71 \pm 75,13$

Vzorky měly srovnatelný charakter průběhu a srovnatelné výsledky zkoušky. Naměřená pevnost spoje se příliš neliší od výsledků testu při vlhkosti 40 %. Ovšem zdá se, že lepidlo vlivem vysoké vlhkosti prostředí ztratilo elasticitu, a to se projevilo snížením prodloužení. Průměrná pevnost lepidla A při působení vlhkosti prostředí 95 % byla naměřena na 22,49 MPa a průměrné prodloužení 0,97 mm.



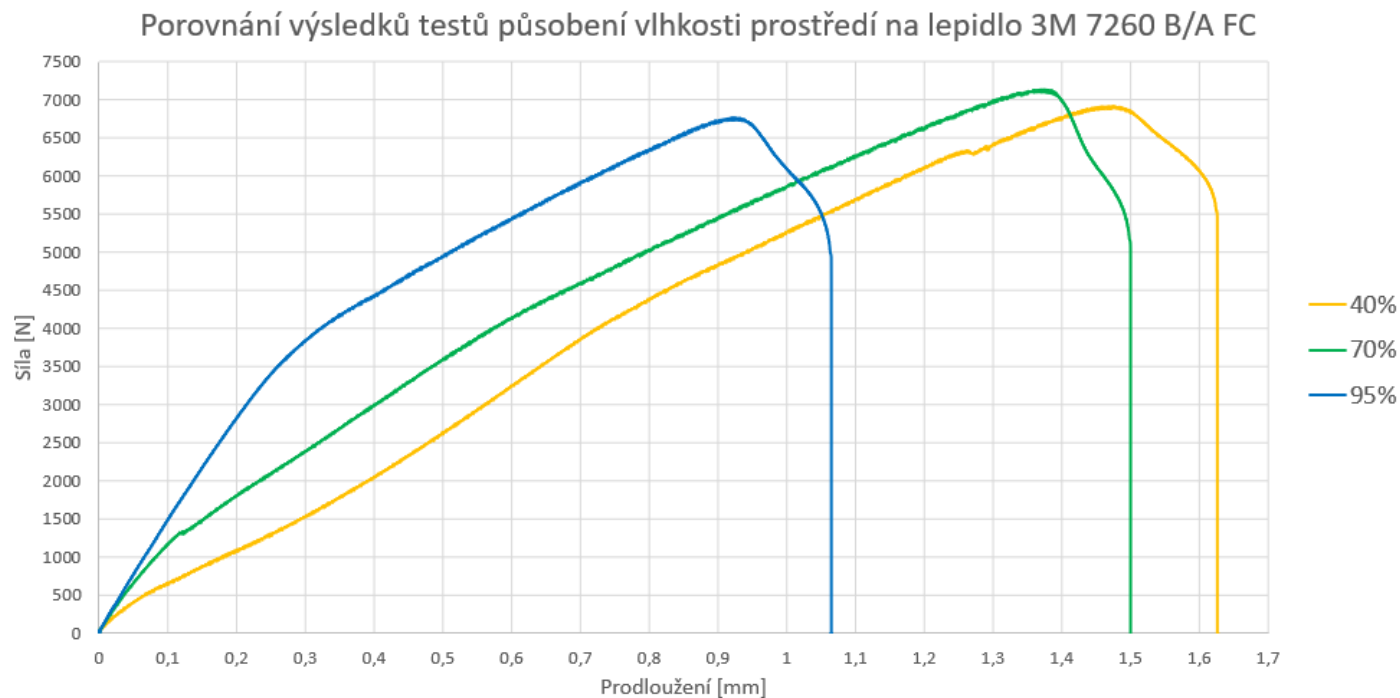
Obr. 9.9: Porušení lepených spojů A10 při vlhkosti prostředí 95 %

K selhání vzorků sady A10 došlo důsledkem speciálního kohezní porušení (SCF), viz obr. 9.9.



Obr. 9.10: Ohnutí lepeného spoje A10 při vlhkosti prostředí 95 %

9.1.4. Shrnutí výsledků zkoušek vlhkosti lepidla 3M 7260 B/A FC

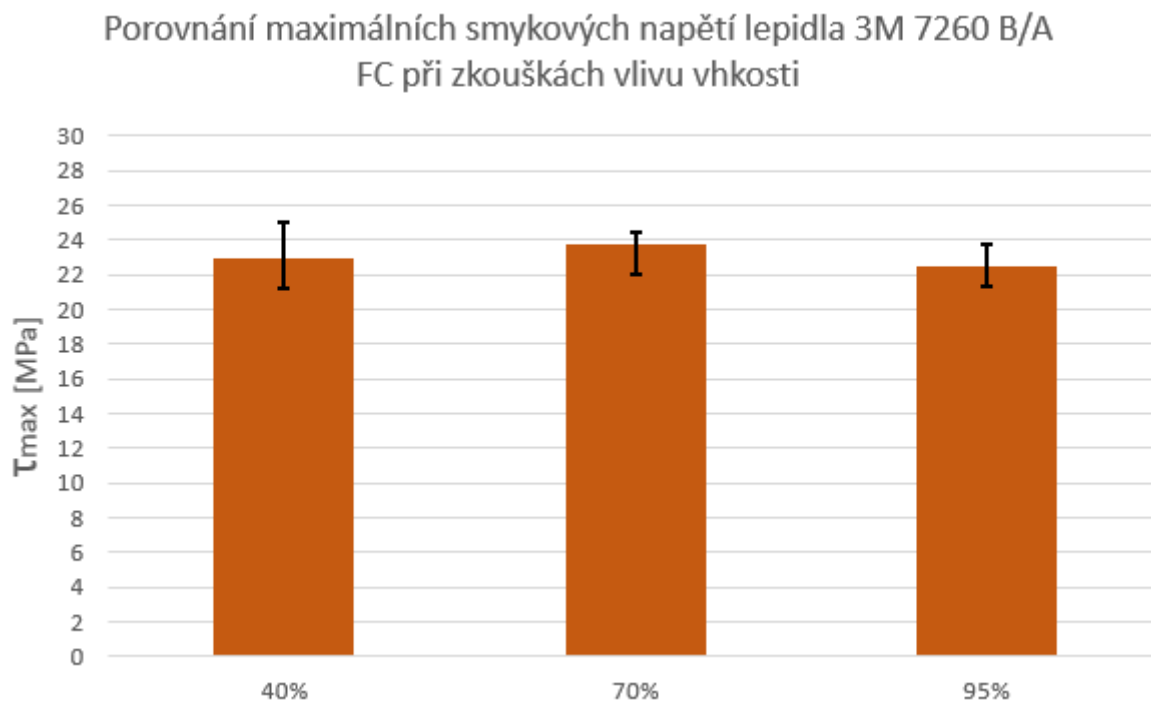


Obr. 9.11: Porovnání výsledků zkoušek vlhkosti lepidla 3M 7260 B/A FC

Tab. 9.4: Porovnání naměřených hodnot zkoušek vlhkosti lepidla 3M 7260 B/A FC

	40 %	70 %	95 %
F [N]	6897,56 ±392,69	7115,23 ±261,42	6746,91 ±283,6
τ [MPa]	22,99 ±1,31	23,72 ±0,87	22,49 ±0,95
Δl [mm]	1,47 ±0,11	1,37 ±0,07	0,93 ±0,05
E [MPa]	4434,58 ±492,91	5598,06 ±530,49	6074,97 ±941,88

Vzorky jednotlivých sad byly po trhací zkoušce odlišně ohnuté, a to bylo pravděpodobně důvodem rozdílného prodloužení a rozdílných tvarů křivek průběhu smykových zkoušek.

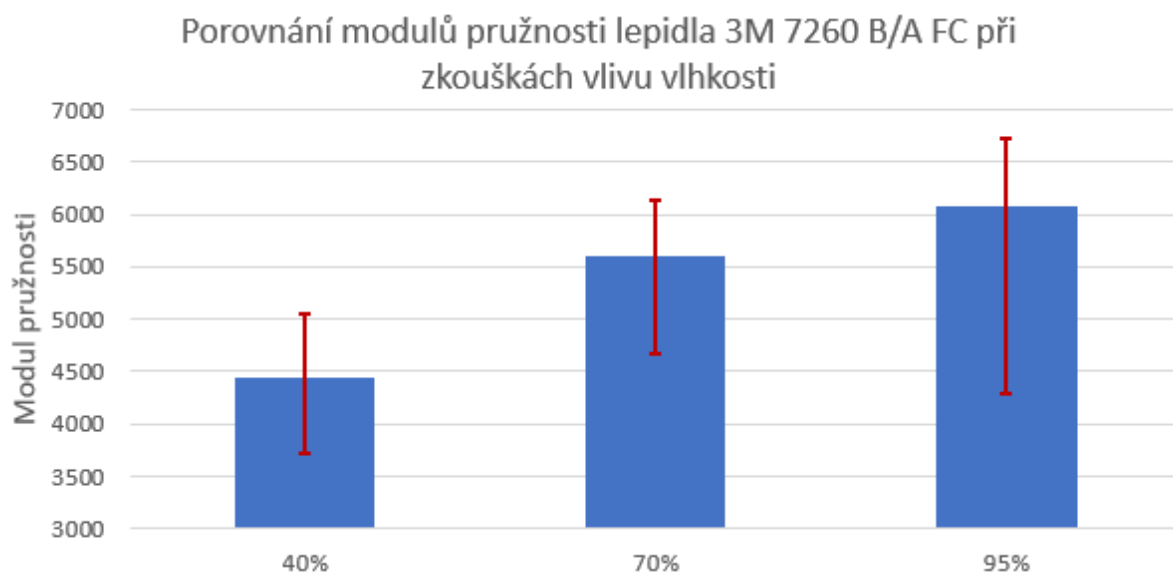


Obr. 9.12: Porovnání maximálních smykových napětí lepidla 3M 7260 B/A FC při zkouškách vlivu vlhkosti

Tab. 9.5: Naměřené maximální smykové napětí lepidla 3M 7260 B/A FC při zkouškách vlivu vlhkosti

	40 %	70 %	95 %
τ_{\max} [MPa]	22,99 ±1,31	23,72 ±0,87	22,49 ±0,95

Výsledky jednotlivých zkoušek vlhkosti jsou srovnatelné a je patrné, že vlhkost prostředí nemá zásadní vliv na smykovou pevnost spoje.



Obr. 9.13: Porovnání modulů pružnosti lepidla 3M 7260 B/A FC při zkouškách vlivu vlhkosti

Tab. 9.6: Naměřené moduly pružnosti lepidla 3M 7260 B/A FC při zkouškách vlivu vlhkosti

	40 %	70 %	95 %
E [MPa]	4434,58 ± 492,91	5598,06 ± 530,49	6074,97 ± 941,88

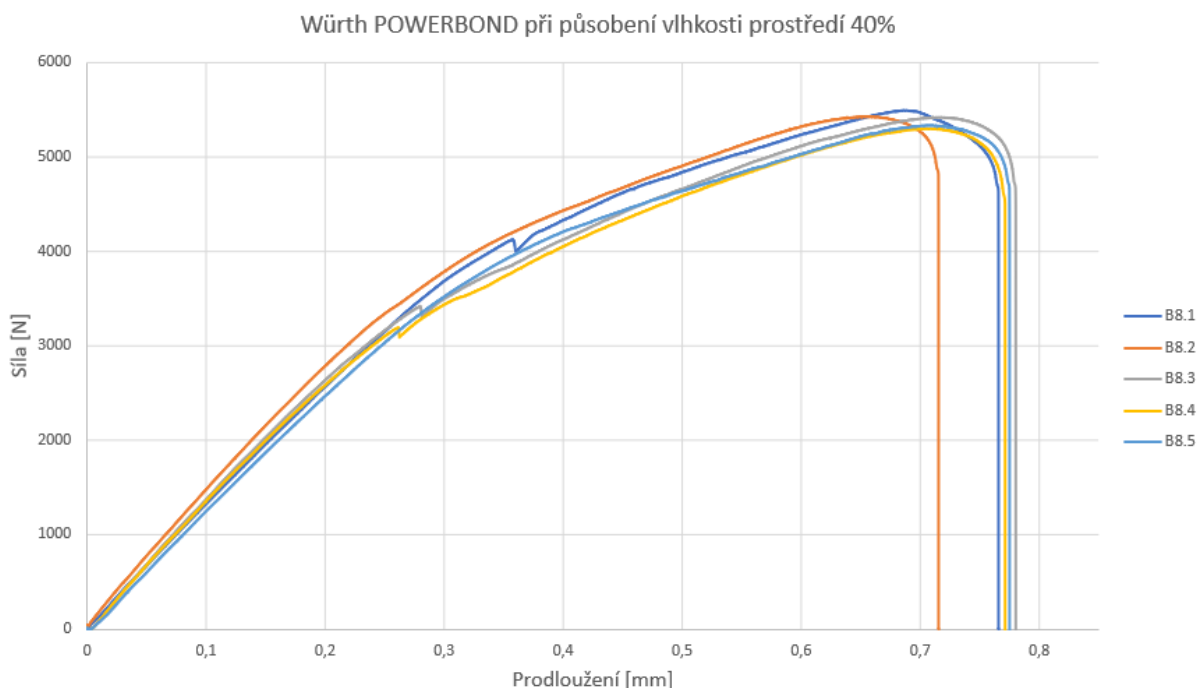
Nejvyšší modul pružnosti byl změřen u vzorků zatěžovaných vlhkostí prostředí 95 %. Můžeme konstatovat, že nižší vlhkost prostředí znamená nižší modul pružnosti spoje.

9.2. Zkoušky závislosti pevnosti lepidla Würth POWERBOND na vlhkosti prostředí

K druhé části zkoušení pevnosti lepených spojů v závislosti na vlhkosti prostředí bylo použito vysokopevnostní dvousložkové lepidlo Würth POWERBOND, dále značeno jako lepidlo B. Detailní výpis vlastností tohoto lepidla je k dispozici v technickém listu, viz příloha č. 7.

9.2.1. Lepidlo B při vlhkosti prostředí 40 %

Následující hodnoty vypovídají o chování lepidla B při působení vlhkosti prostředí 40 %.

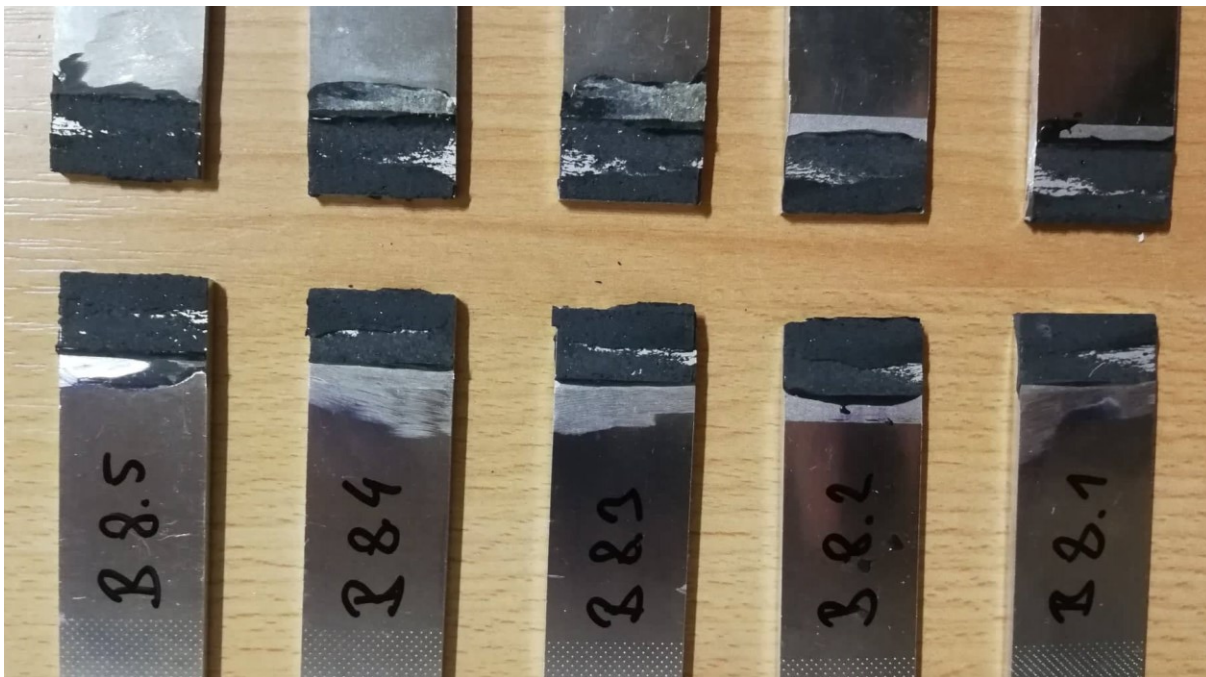


Obr. 9.14: Tahové zkoušky lepených spojů B8 při vlhkosti prostředí 40 %

Tab. 9.7: Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů B8 při vlhkosti prostředí 40 %

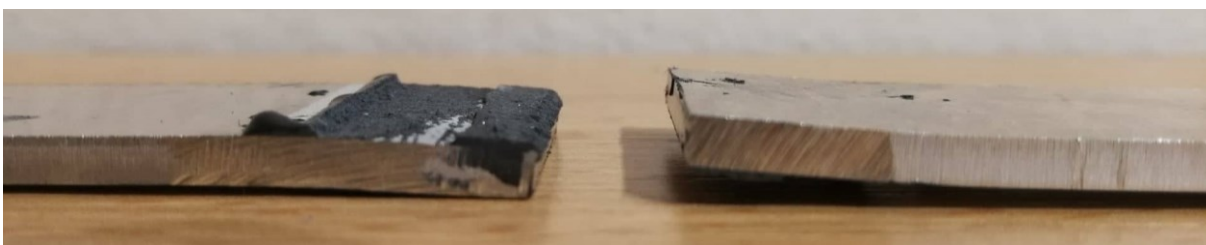
	B8.1	B8.2	B8.3	B8.4	B8.5	\bar{x}
F_{\max} [N]	5492,47	5426,39	5418,14	5299,38	5332,45	5393,77 ±69,38
τ_{\max} [MPa]	18,31	18,09	18,06	17,66	17,77	17,98 ±0,23
Δl [mm]	0,69	0,66	0,72	0,71	0,71	0,69 ±0,02
E [MPa]	2663,74	2758,28	2520,29	2500,44	2507,69	2590,09 ±103,35

Vzorky měly srovnatelný charakter průběhu a srovnatelné výsledky zkoušky. Průměrná pevnost lepidla B při působení vlhkosti prostředí 40 % byla naměřena na 17,98 MPa a průměrné prodloužení 0,69 mm.



Obr. 9.15: Porušení lepených spojů B8 při vlhkosti prostředí 40 %

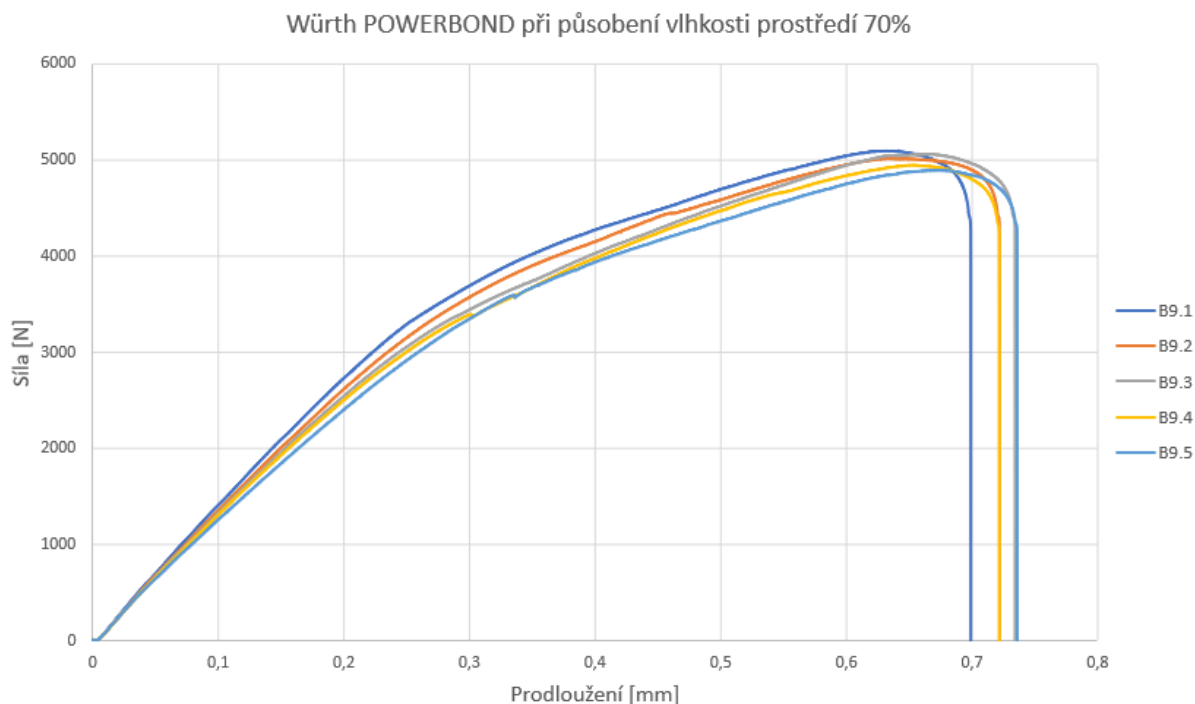
K selhání vzorků sady B8 došlo důsledkem speciálního kohezní porušení (SCF), viz obr. 9.15.



Obr. 9.16: Ohnutí lepeného spoje B8 při vlhkosti prostředí 40 %

9.2.2. Lepidlo B při vlhkosti prostředí 70 %

Následující hodnoty vypovídají o chování lepidla B při působení vlhkosti prostředí 70 %.

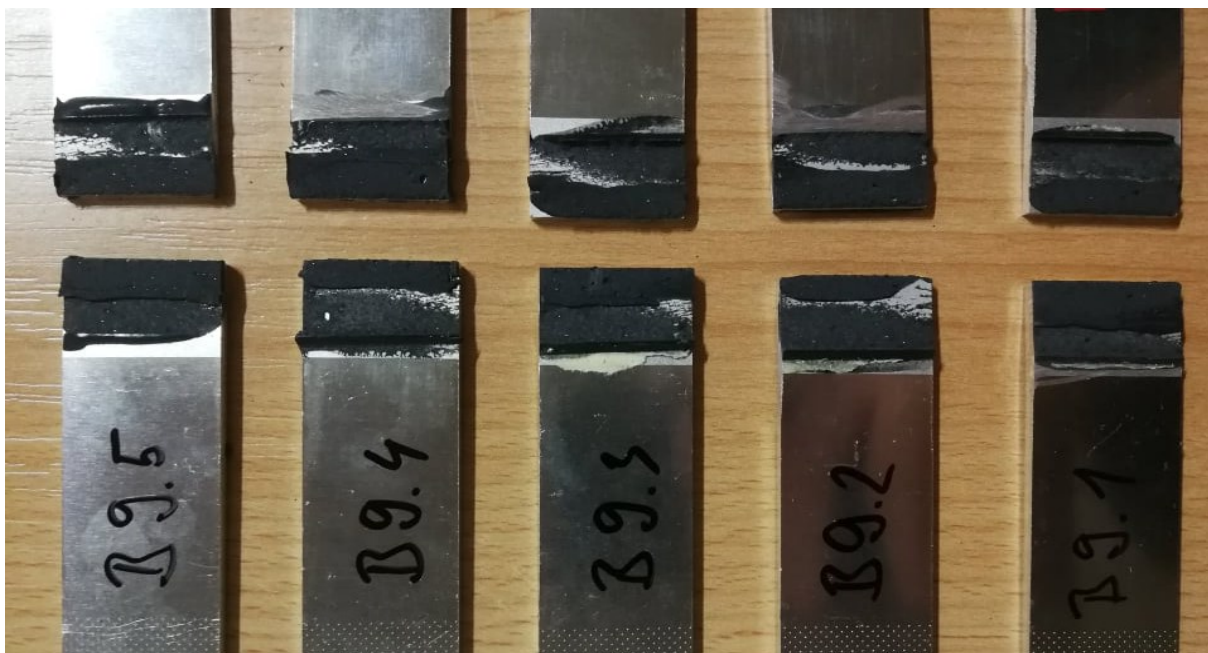


Obr. 9.17: Tahové zkoušky lepených spojů B9 při vlhkosti prostředí 70 %

Tab. 9.8: Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů B9 při vlhkosti prostředí 70 %

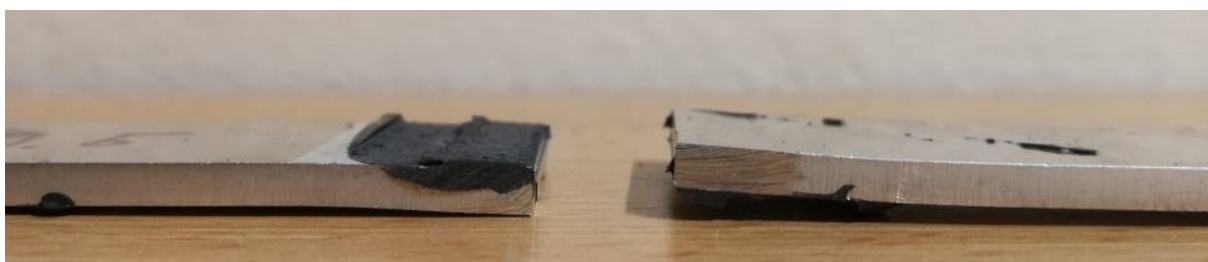
	B9.1	B9.2	B9.3	B9.4	B9.5	\bar{x}
F_{\max} [N]	5094,92	5014,63	5060,20	4945,99	4892,29	5001,61 \pm 73,96
τ_{\max} [MPa]	16,98	16,72	16,87	16,49	16,31	16,67 \pm 0,25
Δl [mm]	0,63	0,63	0,66	0,65	0,68	0,65 \pm 0,017
E [MPa]	2693,05	2642,24	2546,89	2528,79	2412,6	2564,71 \pm 97,19

Vzorky měly srovnatelný charakter průběhu a srovnatelné výsledky zkoušky. Zaznamenáváme lehce nižší pevnost spoje než u předchozího testu. Průměrná pevnost lepidla B při působení vlhkosti prostředí 70 % byla naměřena na 16,67 MPa a průměrné prodloužení 0,65 mm.



Obr. 9.18: Porušení lepených spojů B9 při vlhkosti prostředí 70 %

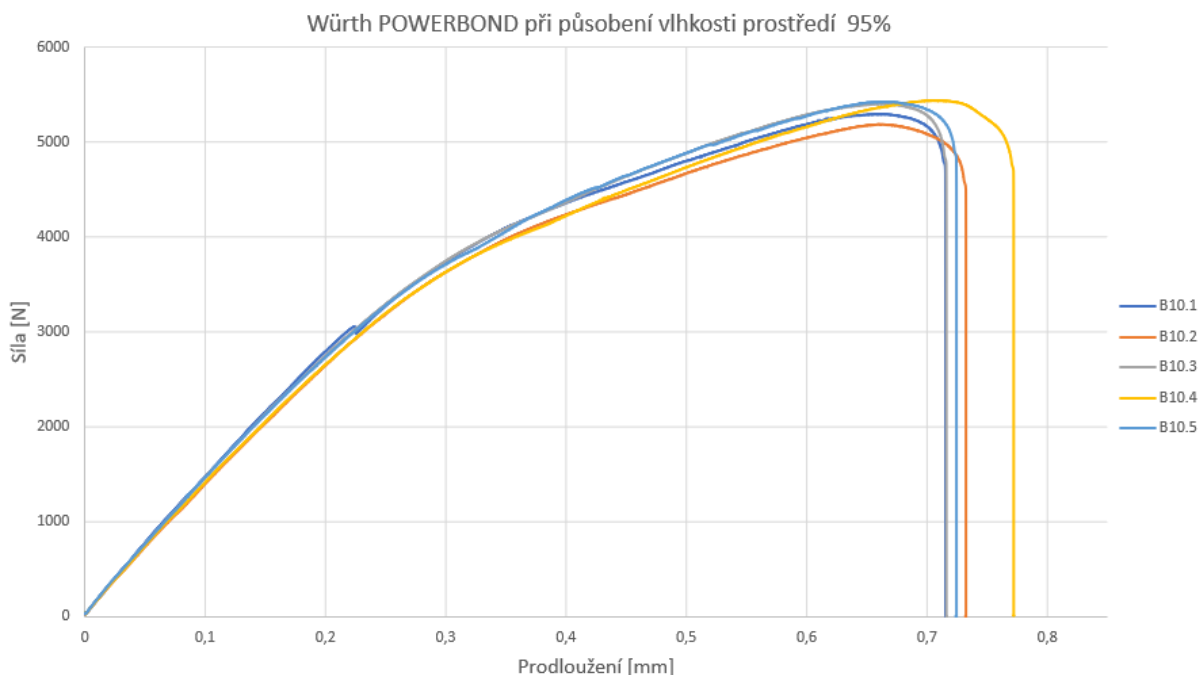
K selhání vzorků sady B9 došlo důsledkem speciálního kohezního porušení (SCF), viz obr. 9.18.



Obr. 9.19: Ohnutí lepeného spoje B9 při vlhkosti prostředí 70 %

9.2.3. Lepidlo B při vlhkosti prostředí 95 %

Následující hodnoty vypovídají o chování lepidla B při působení vlhkosti prostředí 95 %.

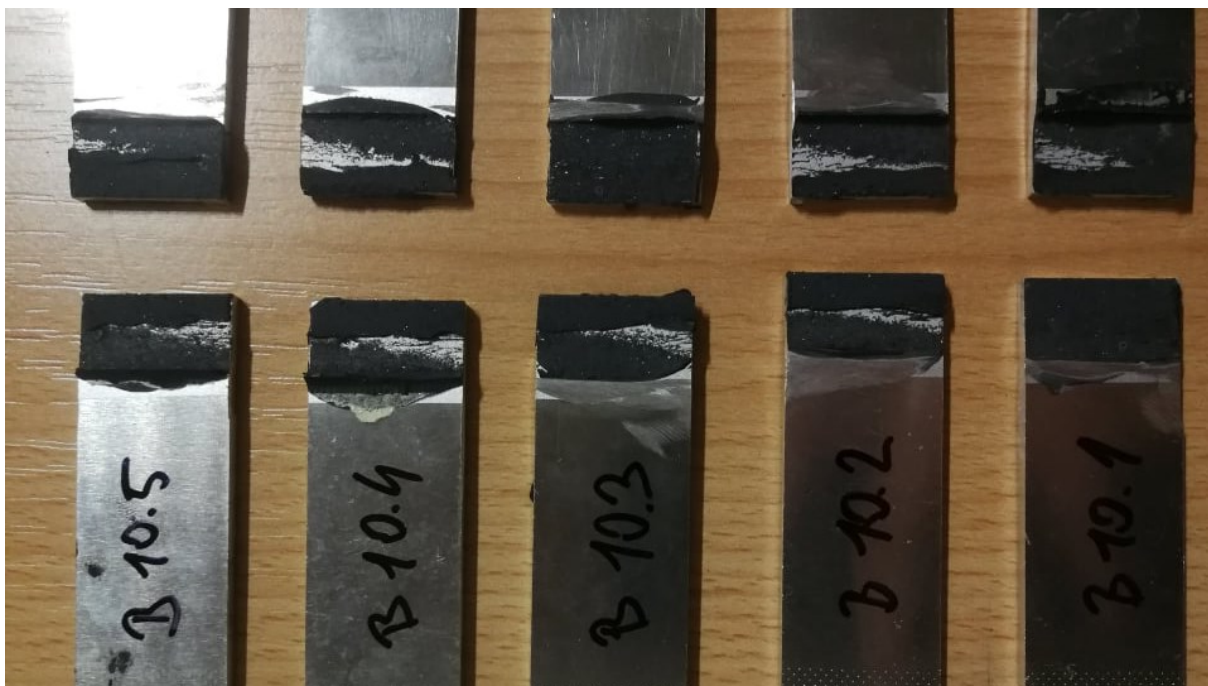


Obr. 9.20: Tahové zkoušky lepených spojů B10 při vlhkosti prostředí 95 %

Tab. 9.9: Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů B10 při vlhkosti prostředí 95 %

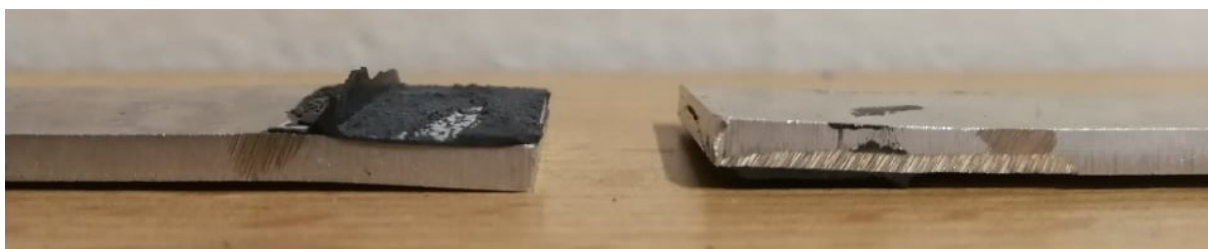
	B10.1	B10.2	B10.3	B10.4	B10.5	\bar{x}
F_{max} [N]	5291,14	5184,03	5400,75	5435,03	5420,84	5346,357 ±95,67
τ_{max} [MPa]	17,64	17,28	18,00	18,12	18,07	17,82 ±0,32
Δl [mm]	0,66	0,66	0,66	0,70	0,66	0,67 ±0,02
E [MPa]	2671,78	2615,14	2720,35	2572,41	2719,52	2659,84 ±58,32

Vzorky měly srovnatelný charakter průběhu a srovnatelné výsledky zkoušky. Výsledky testů jsou téměř identické s testy vlhkosti prostředí 40 %. Průměrná pevnost lepidla B při působení vlhkosti prostředí 95 % byla naměřena na 17,82 MPa a průměrné prodloužení 0,67 mm.



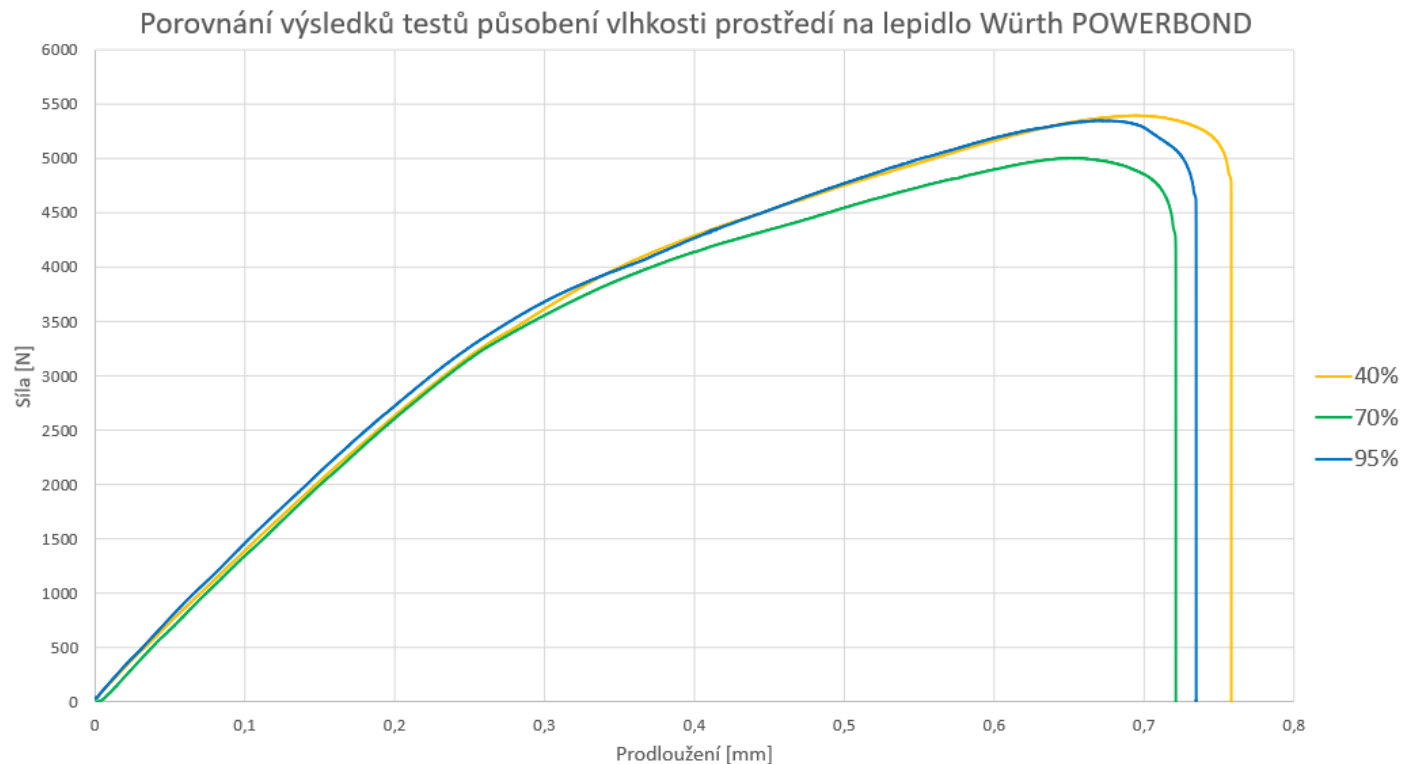
Obr. 9.21: Porušení lepených spojů B10 při vlhkosti prostředí 95 %

K selhání vzorků sady B10 došlo důsledkem speciálního kohezní porušení (SCF), viz obr. 9.21.



Obr. 9.22: Ohnutí lepeného spoje B10 při vlhkosti prostředí 95 %

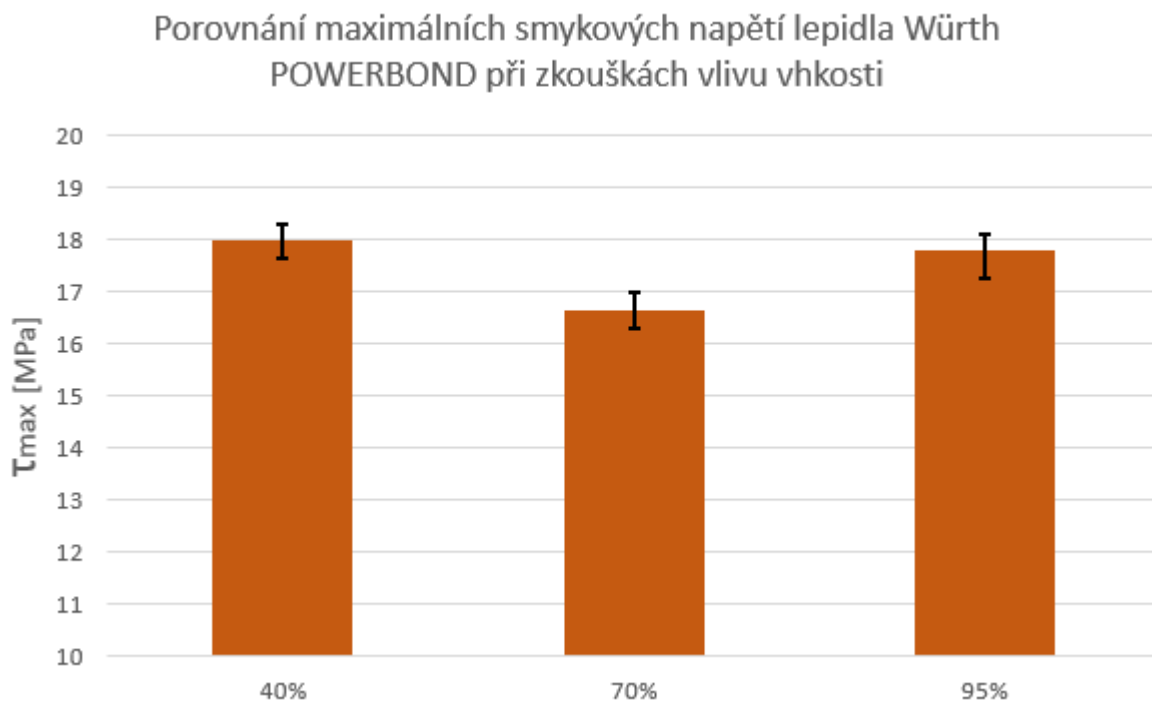
9.2.4. Shrnutí výsledků zkoušek vlhkosti lepidla Würth POWERBOND



Obr. 9.23: Porovnání výsledků tahových zkoušek vlhkosti lepidla Würth POWERBOND

Tab. 9.10: Porovnání naměřených hodnot zkoušek vlhkosti lepidla Würth POWERBOND

	40 %	70 %	95 %
F [N]	5393,77 ±69,38	5001,61 ±73,96	5346,357 ±95,67
τ [MPa]	17,98 ±0,23	16,67 ±0,25	17,82 ±0,32
Δl [mm]	0,69 ±0,02	0,65 ±0,017	0,67 ±0,02
E [MPa]	4545,41 ±298,03	4451,85 ±162,72	4958,55 ±111,76

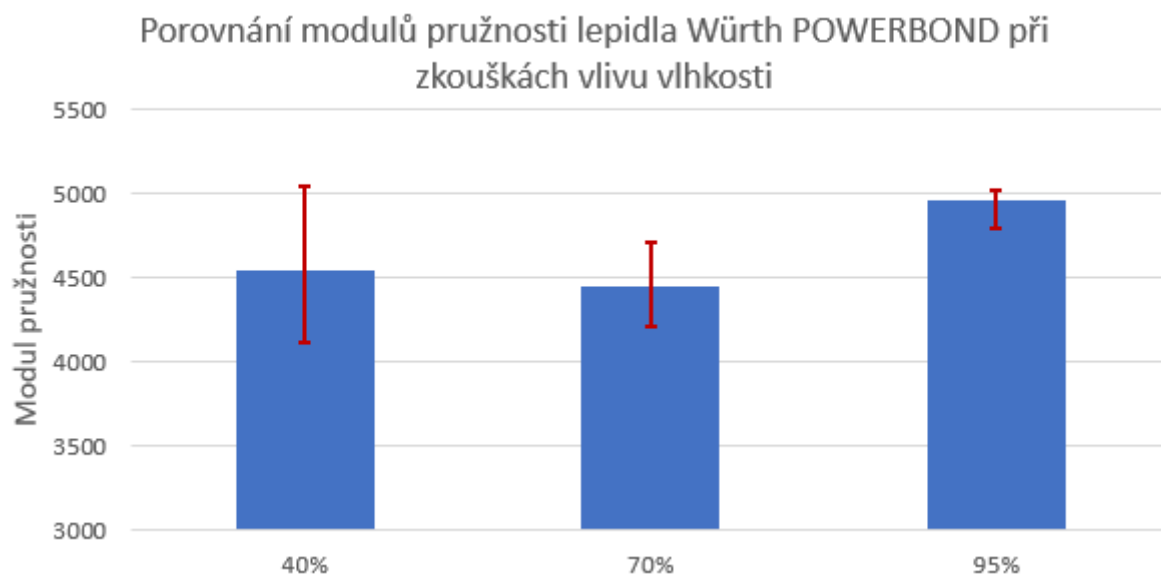


Obr. 9.24: Porovnání maximálních smykových napětí lepidla Würth POWERBOND při zkouškách vlivu vlhkosti

Tab. 9.11: Naměřené maximální smykové napětí lepidla Würth POWERBOND při zkouškách vlivu vlhkosti

	40 %	70 %	95 %
τ_{\max} [MPa]	17,98 ± 0,23	16,67 ± 0,25	17,82 ± 0,32

Výsledky jednotlivých zkoušek vlhkosti byly srovnatelné. Pouze sada zatěžovaná vlhkostí 70 % vykazovala nižší smykovou pevnost oproti ostatním sadám. Je patrné, že vlhkost prostředí nemá příliš velký vliv na smykovou pevnost spoje.



Obr. 9.25: Porovnání modulů pružnosti lepidla Würth POWERBOND při zkouškách vlivu vlhkosti

Tab. 9.12: Naměřené moduly pružnosti lepidla Würth POWERBOND při zkouškách vlivu vlhkosti

	40 %	70 %	95 %
E [MPa]	4545,41 ±298,03	4451,85 ±162,72	4958,55 ±111,76

Nejvyšší modul pružnosti byl změřen u vzorků zatěžovaných vlhkostí prostředí 95 %. Stejně jako u lepidla A můžeme konstatovat, že snižováním vlhkosti klesá i modul pružnosti.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo zjistit závislosti pevnosti lepených spojů na vnějších podmínkách. Byl zkoumán vliv působení teplot od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vliv vlhkostí prostředí na smykovou pevnost spoje a Youngův modul pružnosti. Smyková pevnost byla zjištěna trhací tahovou zkouškou dle normy ČSN EN 1465 a Youngův modul pružnosti vypočten ze vzorce Hookova zákona v oblasti jeho platnosti. Bylo použito dvou typů lepidel, 3M 7260 B/A FC a lepidlo Würth POWERBOND. Zkušební vzorky byly vyrobeny z Al slitiny EN AW 5754.

Rozměry zkušebního vzorku byly $100 \times 25 \times 3\text{ mm}$. Překrytí vzorků bylo 12 mm a stykové plochy byly očištěny laserem. Tloušťka lepidla byla $0,3\text{ mm}$. Vzorky byly po slepení zatíženy statickou silou a ponechané k vytvrzení po dobu 72 hodin při okolní teplotě cca $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Zkouška závislosti na teplotě spočívala v měření pevností spojů za namáhání zkušebních vzorků teplotním rozmezím od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$, s odstupňováním po $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

U teplotních zkoušek lepidla 3M 7260 B/A FC byla dle očekávání naměřena nejvyšší smyková pevnost ($22,78\text{ MPa}$) u vzorků při pokojové teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. U nižších smyková pevnost klesla pouze o minimum. Zvyšováním teploty smyková pevnost postupně klesala. Nejnižší smyková pevnost spoje byla změřena u vzorků při teplotě $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Smyková pevnosti spoje této sady vzorků byla pouhých $8,45\text{ MPa}$, což značí pokles pevnosti o $62,9\%$ v porovnání se vzorky při pokojové teplotě. Prodloužení spoje bylo přímo úměrné k teplotě. Se snižováním i zvyšováním teploty se prodloužení spoje souvisle snižovalo. Ze změřených hodnot byl vypočten Youngův modul pružnosti vycházející z Hookova zákona. Jednoznačně nejvyšší modul pružnosti ($5143,69\text{ MPa}$) byl naměřen u vzorků při teplotě $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při zvyšování teploty postupně klesal modul pružnosti až do hodnoty $3791,64\text{ MPa}$ při teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při teplotě $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ se modul pružnosti zvýšil na $4191,83\text{ MPa}$ a srovnatelný modul pružnosti vydržel až do teploty $65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na teplotě $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ modul pružnosti prudce klesl až na $2449,85\text{ MPa}$.

Rovněž teplotní zkoušky lepidla Würth POWERBOND dle očekávání vykazovaly nejvyšší smykovou pevnost ($17,49\text{ MPa}$) u vzorků při pokojové teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vzorky při teplotě $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ si udržely srovnatelnou pevnost se vzorky vystavenými pokojové teplotě. Ochlazováním do minusových teplot bylo patrné klesání smykové pevnosti. Při zvyšování teploty smyková pevnost postupně klesala. Na teplotě $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ nastalo ustálení pevnosti na $10,64\text{ MPa}$, což značí pokles pevnosti o $38,2\%$ v porovnání se vzorky při pokojové teplotě. Srovnatelnou pevnost vykazovaly vzorky až do teploty $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Prodloužení spoje bylo přímo úměrné k teplotě.

Nejvyšší prodloužení bylo naměřeno u vzorků při teplotě 5 °C. Se snižováním i zvyšováním teploty se prodloužení spoje plynule snižovalo. Nejvyšší modul pružnosti (4828,7 MPa) byl naměřen u vzorků při teplotě -10 °C. Na teplotě 5 °C nastal prudký pokles modulu pružnosti. S plynulým stoupáním teploty do 35 °C se zároveň zvyšoval také modul pružnosti (4517,63 MPa). Na teplotě 50 °C nastal pokles a ustálení modulu pružnosti na 4064 MPa a podobnou pevnost si nesly vzorky až do teploty 80 °C.

Cílem zkoušky závislosti pevnosti spoje na vlhkosti bylo zjistit chování lepidla v prostředí třech různých vlhkostí. Jednotlivé sady vzorků o pěti kusech byly uloženy na 24 hodin do klimakomory o vlhkosti 40, 70 a 95 %.

Smykové pevnosti všech vzorků zkoušek vlhkosti lepidla 3M 7260 B/A FC se pohybovaly okolo 23 MPa. Vzorky jednotlivých sad byly po trhací zkoušce odlišně ohnuté, a to bylo pravděpodobně důvodem rozdílného prodloužení a rozdílných tvarů křivek průběhu smykových zkoušek. Youngův modul pružnosti byl ovlivněn vlhkostí prostředí. Nejvyšší modul pružnosti (6074,97 MPa) byl změřen u vzorků zatěžovaných vlhkostí prostředí 95 %. S postupným snížením vlhkosti prostředí klesl i modul pružnosti na nejnižších 4434,57 MPa při vlhkosti prostředí 40 %. Můžeme konstatovat, že nižší vlhkost prostředí znamená nižší modul pružnosti spoje.

Rovněž výsledky jednotlivých zkoušek vlhkosti lepidla Würth POWERBOND jsou velmi podobné. Pouze sada zatěžovaná vlhkostí 70 % vykazovala nižší smykovou pevnost oproti ostatním sadám. Je patrné, že také u lepidla značky Würth měla vlhkost prostředí téměř zanedbatelný vliv na smykovou pevnost spoje. Smykové pevnosti vzorků vlhkosti 40 a 95 % dosahovaly téměř 18 MPa. Vzorky vlhkosti 70 % vykazovaly pevnost 16,67 MPa. Stejně jako tomu bylo u předchozího testu, také u lepidla Würth POWERBOND byl Youngův modul pružnosti ovlivněn vlhkostí prostředí. Nejvyšší modul pružnosti (4958,55 MPa) byl změřen u vzorků zatěžovaných vlhkostí prostředí 95 %. S postupným snížením vlhkosti prostředí klesl i modul pružnosti. Při vlhkosti prostředí 40 % byl naměřen modul pružnosti 4545,41 MPa. Tato zkouška nás ujišťuje v tom, že nižší vlhkost prostředí znamená nižší modul pružnosti spoje.

Experiment posloužil k upozornění na fakt, že vnější vlivy skutečně přímo ovlivňují vlastnosti lepených spojů. Obě lepidla reagovala na vnější vlivy srovnatelným způsobem. Zjistili jsme, že jakkoliv snížená či zvýšená teplota má za následek pokles smykové pevnosti. Naopak vlhkost prostředí smykovou pevnost téměř neovlivňuje.

Další výzkum bych chtěl vést směrem k praktickému využití. Doporučoval bych vytvořit prostředí simulující skutečný provoz automobilu a zkoumat chování lepeného spoje při provozních teplotách.

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1.1 Adheze a koheze lepidla a lepeného materiálu (str. 12)
- Obr. 1.2 Princip vytvoření mechanické vazby (str. 13)
- Obr. 1.3 Princip vytvoření chemické vazby (str. 13)
- Obr. 1.4 Smáčivost lepidel (str. 14)
- Obr. 1.5 Vliv doby zalisování na pevnost spoje (str. 14)
- Obr. 2.1 Plnivo s částicemi s oblými hranami (str. 17)
- Obr. 2.2 Plniva s ostrohrannými částicemi (str. 18)
- Obr. 3.1 Princip směšovače, průběh směšování dvoukomponentních lepidel (str. 23)
- Obr. 3.2 Dynamický směšovač pro dvoukomponentní lepidla (str. 24)
- Obr. 3.3 Nanášení lepidla pruh vedle pruhu (str. 24)
- Obr. 3.4 Nanášení lepidla pruh na pruh (str. 24)
- Obr. 3.5 Místa použití epoxidových lepidel na karoserii Škoda Octavia 2 (str. 27)
- Obr. 4.1 Lepené spoje na karoserii osobního vozu (str. 30)
- Obr. 4.2 Porovnání technologií spojování u starších a nových vozů hromadné dopravy (str. 32)
- Obr. 5.1 Základní typy lepeného spoje (str. 35)
- Obr. 5.2 Příklady orientace lepeného spoje (str. 36)
- Obr. 5.3 Tryskání (str. 38)
- Obr. 5.4 Průmyslový odmašťovací stroj (str. 39)
- Obr. 5.5 Řez lemovým spojem (str. 40)
- Obr. 6.1 Vzorek zkoušky pevnosti ve smyku (str. 42)
- Obr. 6.2 Univerzální trhací zkušební stroj (str. 43)
- Obr. 6.3 Vzorek zkoušky pevnosti v odlupu (str. 43)
- Obr. 6.4 Definované typy porušení slepených vzorků dle EN 10365 (str. 44)
- Obr. 6.5 Závislost smykové pevnosti na teplotě (str. 45)
- Obr. 7.1 Testovací vzorky z Al slitiny EN AW 5754 (str. 48)
- Obr. 7.2 Vláknový laserový čistící stroj MRJ-FJ-C120C (str. 49)
- Obr. 7.3 Laserovací stanice (str. 50)
- Obr. 7.4 Vymezovací přípravky pro umístění testovacích vzorků (str. 50)
- Obr. 7.5 Parametry laseru (str. 50)
- Obr. 7.6 Očištěný testovací vzorek (str. 51)
- Obr. 7.7 Lepicí prostředí (str. 51)

- Obr. 7.8 Dávkovací pistole Loctite (str. 52)
- Obr. 7.9 Nanesení lepidla na vzorek (str. 52)
- Obr. 7.10 Schéma montáže lepeného spoje (str. 53)
- Obr. 7.12 Montáž spojů (str. 53)
- Obr. 7.12 Vzorek s nadbytečným lepidlem (str. 54)
- Obr. 7.13 Obroušený vzorek (str. 54)
- Obr. 7.14 Pneumatická excentrická bruska (str. 54)
- Obr. 8.1 Schéma zatížení zkušebního vzorku upnutého v čelistech trhacího stroje (str. 55)
- Obr. 8.2 Lepený spoj s termočlánkem upnutý v čelistech trhacího stroje (str. 55)
- Obr. 8.3 Termočlánek zapojený do multimetru (str. 55)
- Obr. 8.4 Trhací stroj SHIMADZU AGS-X spojen s klimakomorou Weissttechnik (str. 56)
- Obr. 8.5 Tahové zkoušky lepených spojů A1 při -10 °C (str. 58)
- Obr. 8.6 Porušení lepených spojů A1 při -10 °C (str. 59)
- Obr. 8.7 Ohnutí lepeného spoje A1 při teplotě -10 °C (str. 59)
- Obr. 8.8 Tahové zkoušky lepených spojů A2 při 5 °C (str. 60)
- Obr. 8.9 Porušení lepených spojů A2 při 5 °C (str. 61)
- Obr. 8.10 Ohnutí lepeného spoje A2 při teplotě 5 °C (str. 61)
- Obr. 8.11 Tahové zkoušky lepených spojů A3 při 20 °C (str. 62)
- Obr. 8.12 Porušení lepených spojů A3 při 20 °C (str. 63)
- Obr. 8.13 Ohnutí lepeného spoje A3 při teplotě 20 °C (str. 63)
- Obr. 8.14 Tahové zkoušky lepených spojů A4 při 35 °C (str. 64)
- Obr. 8.15 Porušení lepených spojů A4 při 35 °C (str. 65)
- Obr. 8.16 Ohnutí lepeného spoje A4 při teplotě 35 °C (str. 65)
- Obr. 8.17 Tahové zkoušky lepených spojů A5 při 50 °C (str. 66)
- Obr. 8.18 Porušení lepených spojů A5 při 50 °C (str. 67)
- Obr. 8.19 Ohnutí lepeného spoje A5 při teplotě 50 °C (str. 67)
- Obr. 8.20 Tahové zkoušky lepených spojů A6 při 65 °C (str. 68)
- Obr. 8.21 Porušení lepených spojů A6 při 65 °C (str. 69)
- Obr. 8.22 Ohnutí lepeného spoje A6 při teplotě 65 °C (str. 69)
- Obr. 8.23 Tahové zkoušky lepených spojů A7 při 80 °C (str. 70)
- Obr. 8.24 Porušení lepených spojů A7 při 80 °C (str. 71)
- Obr. 8.25 Ohnutí lepeného spoje A7 při teplotě 80 °C (str. 71)
- Obr. 8.26 Porovnání výsledků teplotních testů lepidla 3M 7260 B/A FC (str. 72)

- Obr. 8.27 Porovnání maximálních smykových napětí lepidla 3M 7260 B/A FC při teplotních zkouškách (str. 73)
- Obr. 8.28 Porovnání modulů pružnosti lepidla 3M 7260 B/A FC při teplotních zkouškách (str. 74)
- Obr. 8.29 Tahové zkoušky lepených spojů B1 při -10 °C (str. 75)
- Obr. 8.30 Porušení lepených spojů B1 při -10 °C (str. 76)
- Obr. 8.31 Ohnutí lepeného spoje B1 při teplotě -10 °C (str. 76)
- Obr. 8.32 Tahové zkoušky lepených spojů B2 při 5 °C (str. 77)
- Obr. 8.33 Porušení lepených spojů B2 při 5 °C (str. 78)
- Obr. 8.34 Ohnutí lepeného spoje B2 při teplotě 5 °C (str. 78)
- Obr. 8.35 Tahové zkoušky lepených spojů B3 při 20 °C (str. 79)
- Obr. 8.36 Porušení lepených spojů B3 při 20 °C (str. 80)
- Obr. 8.37 Ohnutí lepeného spoje B3 při teplotě 20 °C (str. 80)
- Obr. 8.38 Tahové zkoušky lepených spojů B4 při 35 °C (str. 81)
- Obr. 8.39 Porušení lepených spojů B4 při 35 °C (str. 82)
- Obr. 8.40 Ohnutí lepeného spoje B4 při teplotě 35 °C (str. 82)
- Obr. 8.41 Tahové zkoušky lepených spojů B5 při 50 °C (str. 83)
- Obr. 8.42 Porušení lepených spojů B5 při 50 °C (str. 84)
- Obr. 8.43 Ohnutí lepeného spoje B5 při teplotě 50 °C (str. 84)
- Obr. 8.44 Tahové zkoušky lepených spojů B6 při 65 °C (str. 85)
- Obr. 8.45 Porušení lepených spojů B6 při 65 °C (str. 86)
- Obr. 8.46 Ohnutí lepeného spoje B6 při teplotě 65 °C (str. 86)
- Obr. 8.47 Tahové zkoušky lepených spojů B7 při 80 °C (str. 87)
- Obr. 8.48 Porušení lepených spojů B7 při 80 °C (str. 88)
- Obr. 8.49 Ohnutí lepeného spoje B7 při teplotě 80 °C (str. 88)
- Obr. 8.50 Porovnání výsledků teplotních testů lepidla Würth POWERBOND (str. 89)
- Obr. 8.51 Porovnání maximálních smykových napětí lepidla Würth POWERBOND při teplotních zkouškách (str. 90)
- Obr. 8.52 Porovnání modulů pružnosti lepidla Würth POWERBOND při teplotních zkouškách (str. 91)
- Obr. 9.1 Schéma zatížení zkušebního vzorku upnutého v čelistech trhačního stroje (str. 92)
- Obr. 9.2 Tahové zkoušky lepených spojů A8 při vlhkosti prostředí 40 % (str. 93)
- Obr. 9.3 Porušení lepených spojů A8 při vlhkosti prostředí 40 % (str. 94)
- Obr. 9.4 Ohnutí lepeného spoje A8 při vlhkosti prostředí 40 % (str. 94)

- Obr. 9.5 Tahové zkoušky lepených spojů A9 při vlhkosti prostředí 70 % (str. 95)
- Obr. 9.6 Porušení lepených spojů A9 při vlhkosti prostředí 70 % (str. 96)
- Obr. 9.7 Ohnutí lepeného spoje A9 při vlhkosti prostředí 70 % (str. 96)
- Obr. 9.8 Tahové zkoušky lepených spojů A10 při vlhkosti prostředí 95 % (str. 97)
- Obr. 9.9 Porušení lepených spojů A10 při vlhkosti prostředí 95 % (str. 98)
- Obr. 9.10 Ohnutí lepeného spoje A10 při vlhkosti prostředí 95 % (str. 98)
- Obr. 9.11 Porovnání výsledků zkoušek vlhkosti lepidla 3M 7260 B/A FC (str. 100)
- Obr. 9.12 Porovnání maximálních smykových napětí lepidla 3M 7260 B/A FC při zkouškách vlivu vlhkosti
- Obr. 9.13 Porovnání modulů pružnosti lepidla 3M 7260 B/A FC při zkouškách vlivu vlhkosti (str. 101)
- Obr. 9.14 Tahové zkoušky lepených spojů A8 při vlhkosti prostředí 40 % (str. 101)
- Obr. 9.15 Porušení lepených spojů A8 při vlhkosti prostředí 40 % (str. 102)
- Obr. 9.16 Ohnutí lepeného spoje A8 při vlhkosti prostředí 40 % (str. 102)
- Obr. 9.17 Tahové zkoušky lepených spojů A9 při vlhkosti prostředí 70 % (str. 103)
- Obr. 9.18 Porušení lepených spojů A9 při vlhkosti prostředí 70 % (str. 104)
- Obr. 9.19 Ohnutí lepeného spoje A9 při vlhkosti prostředí 70 % (str. 104)
- Obr. 9.20 Tahové zkoušky lepených spojů A10 při vlhkosti prostředí 95 % (str. 105)
- Obr. 9.21 Porušení lepených spojů A10 při vlhkosti prostředí 95 % (str. 106)
- Obr. 9.22 Ohnutí lepeného spoje A10 při vlhkosti prostředí 95 % (str. 106)
- Obr. 9.23 Porovnání výsledků zkoušek vlhkosti lepidla Würth POWERBOND (str. 107)
- Obr. 9.24 Porovnání maximálních smykových napětí lepidla Würth POWERBOND při zkouškách vlivu vlhkosti (str. 108)
- Obr. 9.25 Porovnání modulů pružnosti lepidla Würth POWERBOND při zkouškách vlivu (str. 110)

SEZNAM TABULEK

- Tab. 3.1 Využití lepidel při konstrukci automobilu (str. 25)
- Tab. 4.1 Možnost kombinování různých spojení s technikou lepení (str. 31)
- Tab. 4.2 Technologie spojování a jejich vlastnosti (str. 32)
- Tab. 5.1 Omezující faktory pro volbu lepidla (str. 34)
- Tab. 7.1 Chem. složení a mech. vlastnosti Al slitiny EN AW 5754 (str. 48)
- Tab. 7.2 Technické vlastnosti Al slitiny EN AW 5754 (str. 48)
- Tab. 8.1 Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů A1 při -10 °C (str. 58)
- Tab. 8.2 Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů A2 při 5 °C (str. 60)
- Tab. 8.3 Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů A3 při 20 °C (str. 62)
- Tab. 8.4 Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů A4 při 35 °C (str. 64)
- Tab. 8.5 Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů A5 při 50 °C (str. 66)
- Tab. 8.6 Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů A6 při 65 °C (str. 68)
- Tab. 8.7 Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů A7 při 80 °C (str. 70)
- Tab. 8.8 Porovnání naměřených hodnoty tahových zkoušek lepidla 3M 7260 B/A (str. 72)
- Tab. 8.9 Porovnání maximálních smykových napětí lepidla 3M 7260 B/A FC při teplotních zkouškách (str. 73)
- Tab. 8.10 Porovnání modulů pružnosti lepidla 3M 7260 B/A FC při teplotních zkouškách (str. 74)
- Tab. 8.11 Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů B1 při -10 °C (str. 75)
- Tab. 8.12 Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů B2 při 5 °C (str. 77)
- Tab. 8.13 Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů B3 při 20 °C (str. 79)
- Tab. 8.14 Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů B4 při 35 °C (str. 81)
- Tab. 8.15 Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů B5 při 50 °C (str. 83)
- Tab. 8.16 Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů B6 při 65 °C (str. 85)
- Tab. 8.17 Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů B7 při 80 °C (str. 87)
- Tab. 8.18 Porovnání naměřených hodnot tahových zkoušek lepidla Würth POWERBOND (str. 89)
- Tab. 8.19 Porovnání maximálních smykových napětí lepidla Würth POWERBOND při teplotních (str. 90)
- Tab. 8.20 Porovnání modulů pružnosti lepidla Würth POWERBOND při teplotních zkouškách (str. 91)

Tab. 9.1 Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů A8 při vlhkosti prostředí 40 % (str. 93)

Tab. 9.2 Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů A9 při vlhkosti prostředí 70 % (str. 95)

Tab. 9.3 Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů A10 při vlhkosti prostředí 95 % (str. 97)

Tab. 9.4 Porovnání naměřených hodnot zkoušek vlhkosti lepidla 3M 7260 B/A FC (str. 99)

Tab. 9.5 Naměřené maximální smykové napětí lepidla 3M 7260 B/A FC při zkouškách vlivu vlhkosti (str. 100)

Tab. 9.6 Naměřené moduly pružnosti lepidla 3M 7260 B/A FC při zkouškách vlivu vlhkosti (str. 101)

Tab. 9.7 Porovnání modulů pružnosti lepidla Würth POWERBOND při zkouškách vlivu vlhkosti (str. 102)

Tab. 9.8 Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů B8 při vlhkosti prostředí 40 % (str. 104)

Tab. 9.9 Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů B9 při vlhkosti prostředí 70 % (str. 106)

Tab. 9.10 Naměřené hodnoty tahových zkoušek lepených spojů B10 při vlhkosti prostředí 95 % (str. 108)

Tab. 9.11 Porovnání naměřených hodnot zkoušek vlhkosti lepidla Würth POWERBOND (str. 110)

Tab. 9.12 Porovnání modulů pružnosti lepidla Würth POWERBOND při zkouškách vlivu vlhkosti (str. 112)

SEZNAM VZORCŮ

1	Výpočet smykové pevnosti	[MPa]
2	Výpočet Youngova modulu pružnosti	[MPa]

SEZNAM POUŽITÝCH LITERÁRNÍCH ZDROJŮ

- [1] *Základy teorie lepení* [online]. Brno: LEAR, a. s., 2011 [cit. 2020-11-19]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/lepeni/Teorie_lepeni%20_%20LEAR.pdf
- [2] BRIŠ, Petr, Jiří KUBĚNA a Jan ŠTRKAŇ. *Lepení v praxi*. Praha: Grada Publishing, a.s., 2017. ISBN 978-80-271-9259-5.
- [3] DOUBEK, Pavel a Kolnerová MICHAELA. *Základy technologie lepení karosářských výlisků*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-170-2.
- [4] PETERKA, Jindřich. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. Praha: SNTL, 1980.
- [5] ČSN EN 923: *Lepidla – Termíny a definice*. 2016. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [6] LANGMAIER, František. *Adhese a adheziva*. Zlín: FT VUT Zlín, 1999. ISBN 8021413735.
- [7] KOLNEROVÁ, Michaela. *Technologie lepení v automobilovém průmyslu* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/lepeni.pdf
- [8] LANG, Boleslav. *Vliv teploty na pevnost lepeného spoje*. Liberec, 2006. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [9] KOVAČIČ, Lubomír. *Lepenie kovov a plastov*. První. Praha: SNTL, 1980.
- [10] HISEM, P. a L. ELISOVÁ. *Využití lepení ve stavbě automobilových karoserií*. Praha: TM vydavatelství, 2003, 32 s. ISSN 1212 - 40444.
- [11] OSTEN, Miloš a Josef MLEZIVA. *Práce s lepidly a tmely*. Třetí vydání. Praha: Grada Publishing, a.s., 1996. ISBN 80-716-9338-3.
- [12] ČSN EN 14173: *T- Zkouška v odlupování slepů z ohebných adherendů*. Praha: Český normalizační institut, 2005.

- [13] PIZZI, A. a K. L. MITTAL. *Handbook of adhesive technology*. New York: Dekker, 2003. ISBN 0-8247-0986-1.
- [14] ČSN ISO 10365: *Lepidla. Označení hlavních typů porušení lepeného spoje*. Pardubice: SYNPO, 1995.
- [15] BROCKMANN, W., P. L. GEISS, J. KLINGER a B. SCHODER. *Adhesive bonding*. Weinheim: Wiley-Vch, 2008. ISBN 978-3-527-31898-4.
- [16] DUCHÁČEK, V. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [17] YMIETZ, D. a A. LUTZ. *Strukturleben im Fahrzeugbau*. Mnichov. ISBN 10:3-937889-43-4.
- [18] KREJČÍ, Adam. *Lepení v autoprůmyslu*. Brno, 2018. Bakalářská práce. VUT v Brně.
- [19] Adhesive joint design. In: *Substech Substances & Technologies* [online]. [cit. 2020-02-25]. Dostupné z:
http://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/detail.php?id=adhesive_joints&cache=cache&media=adhesive_joint_design.png

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 Technický list Al slitiny EN AW 5754

Příloha č. 2 Provozní řád laserového čistícího stroje MRJ-FJ-C120C

Příloha č. 3 Technické parametry laserového čistícího stroje MRJ-FJ-C120C

(<https://www.mrj-laserclean.com/laser-cleaning-machine/120w-portable-backpack-laser-cleaning-machine.html>)

Příloha č. 4 Technický list lepidla 3M 7260 B/A FC

(https://www.3mcesko.cz/3M/cs_CZ/p/d/v000117898/)

Příloha č. 5 Technický list lepidla Würth POWERBOND

(<https://eshop.wuerth.cz/Kategorie-produktu/Lepidlo-na-karoserie-Powerbond/31463005020201.cyd/3146.cgid/cs/CZ/CZK/>)

Příloha č. 6 Katalog klimakomory Tensile Test–Climate Chamber, TensileEvent

(https://www.weiss-technik.com/fileadmin/Redakteur/Mediathek/Broschueren/WeissTechnik/Umweltsimulation/WeisstechNIK_TensileEvent_EN_200709.pdf)

Příloha č. 7 Technický list trhacího stroje SHIMADZU AGS-X

EN AW 5754

Znaky slitiny	
Slitina	EN AW 5754 [AlMg3]
Typ slitiny	nevytvrditelná, přirozeně tvrdá
Povrch	H111
Stav materiálu	válcovaný povrch

Mechanické vlastnosti ¹⁾		typické hodnoty
Mez kluzu $R_{p0,2}$	[MPa]	80
Pevnost v tahu R_m	[MPa]	190 – 240
Tažnost A_{50}	[%]	16 – 17
Tvrdość HBW	[2,5/62,5]	50

Fyzikální vlastnosti ¹⁾		typické hodnoty
Objemová hmotnost	[g/cm ³]	2,67
Modul pružnosti	[GPa]	~ 70
Elektrická vodivost	[m/Ω · mm ²]	20 – 23
Koeficient tepelné roztažnosti	[K ⁻¹ · 10 ⁻⁶]	23,9
Tepelná vodivost	[W/m · K]	140 – 160
Specifická tepelná kapacita	[J/kg · K]	900

Technologické vlastnosti ²⁾		typické hodnoty
Tvarová stálost/Vnitřní pnutí		3 – 4
Obrobitelnost		4
Vhodnost k erozivnímu obrábění		1
Svařitelnost (plyn / WIG / MIG / Odporové / EB)		2 / 1 / 1 / 3 / 1
Odolnost proti korozi (mořská voda / povětrí / SpRK)		1 / 1 / 4
Použití při vysokých teplotách (max. °C při dlouhodobém/krátkodobém zatížení) ³⁾		120 / 180
Eloxování (technické / dekorativní / tvrdé-) ⁴⁾		1 / 2 / 1
Leštitelnost		1 – 2
Vhodnost k leptání struktur		4 – 5
Kontakt s potravinami (podle EN 602)		ano

Tolerance			
Při tloušťce [mm]	Rovinnost [mm] ⁵⁾	Tloušťka [mm]	Délka & šířka [mm]
3 – 50	EN 485-3	EN 485-3	EN 485-3
Zuschnitte			DIN ISO 2768-1m

Dodávané formáty		
Formáty [mm]	1.520 × 3.020	u tloušťek od 5 – 50 mm
Tloušťky na skladě	5 ; 6 ; 8 ; 10 ; 12	
	15 ; 20 ; 25 ; 30 ; 40 ; 50	
Další tloušťky podle poptávky!		

1) Typické hodnoty při pokojové teplotě.

2) Relativní hodnoty hliníkových materiálů od 1 (velmi dobrý) do 6 (nevhodný).

3) Bez ztráty pevnosti po ochlazení.

4) Výlučně technická anodizace. Neposkytujeme žádnou záruku na barevný vzhled/řešení.

5) Tolerance rovinnosti se měří výlučně na měřicích stolech a s použitím ocelového pravítka.

PROVOZNÍ ŘÁD **pro pracoviště s laserem místnost č. JB009**

Tento provozní řád určuje pravidla chování při práci s laserovým zařízením umístěným ve vyhrazených prostorách: JB009

Popis činnosti:

bezkontaktní čištění povrchu

Jména osob, které mohou na pracovišti obsluhovat a na zařízení pracovat:

Ing. Pavel Klaus, Ph.D.

Ing. Marek Beseda

Ing. Miroslav Suchánek

Ing. Filip Huvar

Jméno osoby za vypracování pracovních postupů:

Ing. Pavel Klaus, Ph.D.

Popis zařízení laseru:

Vláknový laserový čistící stroj MRJ-FL-C120C

Klasifikace laseru:

TŘÍDA 4 - lasery velkých výkonů, nebezpečné nejen pro oko, ale i kůži, je nebezpečné přímé ozáření a také zrcadlový a difuzní odraz:

- výkon zdroje dosahuje hodnotu 120 W
- hrozí vysoké nebezpečí poškození zdraví

Působení laserového záření na lidský organizmus:

Laserový paprsek se vyznačuje vlastnostmi jako je úzká spektrální čára (rozsah vlnové délky záření) a malá rozbíhavost svazku. To může negativně působit především na lidské oko případně na pokožku. Působení na lidské oko může mít z hlediska spektrální závislosti následující vlivy:

- UV záření – zánět rohovky, fotochemický šedý zákal
- Viditelné záření (světlo) – poškození sítnice tepelné a fotochemické
- Infračervené záření - šedý zákal, spálení sítnice (780 – 1400 nm), zakalení rohovky, šedý zákal (1400 – 3000 nm), spálení rohovky (3 mikrony – 1 mm)

Působení na pokožku může mít za následek popálení, zrychlené stárnutí kůže, zvýšená pigmentace případně až spálení kůže.

Technické údaje

Aplikace	Sestava laminace velkých ploch, Uchycení a zdobení, Lepení panelů k rámu a výztuh k panelům, Utěšňování, zalévání a zapouzďování elektroniky, Spojování malými spoji
Barva výrobku	Černá
Forma Produktu	Kartuše
Fyzická forma	Tekutina
Objem	400 mL
Obory	Opracování kovů, Reklama, Speciální vozidlo, Zpracování dřeva
Podkladový materiál	Keramika, Sklo, Kov (nelakovaný), Lak, Barvy (práškový lak, lakovaný kov, kompozitní panel), Plasty: HSE, MSE (ABS, akryl, polykarbonát, nylon), Kámen
Pracovní doba	90 minut
Samozhášení	UL94 HB
Teplota aplikace do (Celsius)	100 Stupeň Celsia
Teplota aplikace od (Celsius)	-55 Stupeň Celsia
Typ lepidla	Epoxidová
Uvnitř/venku	Oba

Údaje o výrobku

- Vynikající pevnost ve smyku a odolnost vůči odlupování pro odolné spoje s dlouhou životností.
- Vynikající přilnavost ke kovovým povrchům a teplem tvrditelným plastům.
- K dispozici s dobou zpracovatelností až 90 min (varianta s rychlým vytvrzením) nebo 300 min (standardně).
- 400 ml

3M™ Scotch-Weld™ B/A 7260 je vysoce účinné dvousložkové epoxidové konstrukční lepidlo tužené tvrdidlem.

Mimořádně trvanlivé lepidlo nabízí vynikající přilnavost ke kovům a teplem tvrditelným plastům.

LEPIDLO NA KAROSERIE POWERBOND

Vysokopevnostní dvousložková epoxidová pryskyřice pro opravy karoserií

- Chemická báze: Epoxidová pryskyřice
- Barva: Černá
- Hustota: 1,1 g/cm³
- Pach/vůně: Charakteristický
- Min. pevnost v tahu: 30 N/mm²
- Min. kombinovaná pevnost v tahu a pevnost ve smyku: 1.7 N/mm²
- Podmínky pro kombinovanou pevnost v tahu a pevnost ve smyku: Po 4 hodinách, 23°C, EN 1465
- Podmínky pro pevnost v tahu: 23°C, ASTM D-638
- Tvrdost podle Shoreho D: 80
- Podmínka pro tvrdost podle Shoreho: Podle normy DIN 53505
- Doba zpracovatelnosti: 60 min
- Podmínky pro dobu zpracovatelnosti: při 23°C
- Doba vytvrzení: 4 h
- Min./max. odolnost vůči teplotám: -30 až +120 °C
- Min./max. teplota zpracování: 15 až 25 °C
- Max. krátkodobá odolnost vůči teplotám: 190 °C
- Max. konečná pevnost: 72 h
- Podmínky pro konečnou pevnost: při 23°C
- Odolné vůči: Benzin, Motorová nafta, Chladicí kapalina, Motorové a převodové oleje
- Neobsahuje VOC: Ano
- Neobsahuje silikon: Ano
- Doba použitelnosti od data výroby: 12 Měsíce
- Doplnkové výrobky: Acetonový čisticí přípr., č. 0893 460; odrezovač Quattro, obj. č. 0893 214 1; pneum. axiální bruska, obj. č. 07032310; Flexi-Disc, obj. č. 0578 705 ...; nylon-fleecový kotouč, obj. č. 0673 22 50/75; ,mini fleecový kotouče, obj. č. 0673205.../207...; samosv.

Příloha č.7: Technický list trhačího stroje SHIMADZU AGS-X



Stojní provedení		Podlahové provedení	
AGS-50KNXD		AGS-100KNX	AGS-300KNX
50KN		100KN	300KN
Jemná regulace otáček přesného šroubu pohonu uloženým bez vůle v klíčkovém ložisku			
V rozmezí ± 0.5% ze zobrazované zkušební síly (od 1/500 do 1/1 jmenovité síly)		V rozmezí ± 0.5% ze zobrazované zkušební síly (od 1/250 do 1/1 jmenovité síly)	
Dle EN 10002-2 třída 0.5, ISO 7500-1 třída 0.5, BS 1610 třída 0.5, a ASTM E4, JIS 87721 třída 0.5.*1			
V rozmezí ± 1% ze zobrazované zkušební síly (od 1/500 do 1/1 jmenovité síly snímače)			
Dle EN 10002-2 třída 1, ISO 7500-1 třída 1, BS 1610 třída 1, a ASTM E4, JIS 87721 třída 1.*1			
Automatická kalibrace zkušební síly: pouze v tahu nebo tlaku, a nebo v tahu i tlaku			
0.001 až 800 mm/min (plynule)		0.001 až 500 mm/min (plynule)	
1100mm/min		550mm/min	
±0.1%			
Celý rozsah zkušebních sil lze aplikovat v celém rozsahu rychlostí přičniku		0.001200kN/0.001 500mm/min (v celém rozsahu rychlostí) 200kN 300kN/0.001 400mm/min	
1210mm (745mm, MWG)	1255mm (745mm, MWG)	1475mm (635mm, MWG)	
425mm	600mm		
Optický otáčkoměr			
Digitální zobrazení (rozlišení zobrazení: 0.001 mm)			
±0.1% zobrazované hodnoty nebo ±0.01 mm, která je větší			
1000Hz max. *4			
40 souborů (PC link: 20 souborů, standalone ovladač: 20 souborů)			
<ul style="list-style-type: none">Automatické načtení vlastností snímače sílyZobrazení zkušební síly, dráhy a deformace		<ul style="list-style-type: none">Automatické řízení zkušební síly / napětí (Autotuning)Automatické řízení dráhy (Autotuning) *4Zkušební síla auto-vynulováníZkušební síla auto-kalibraceDetekce lom, automatický návratDetekce přetížení snímače sílyDetekce dotyku	
<ul style="list-style-type: none">Externí analogové výstupy (2 kanály)Externí analogové vstupy (2 kanály) *4Externí digitální vstupy (2 kanály) *4Analogový záznamník (doplněk) výstup			

Snímač síly (s CAL kabelem), kabel napájení 5 m, kabelové svorky, návod k obsluze

	400V model	200V model	400V model	200V model
Jednofázové AC200-230V 50/60Hz 4.0kVA	Třířázové AC380-440V 50/60Hz 4.5kVA	Třířázové AC200-230V 50/60Hz 6.5kVA	Třířázové AC380-440V 50/60Hz 5.5kVA	Třířázové AC200-230V 50/60Hz 7.5kVA
Kolikání el. síly do $\pm 10\%$ ze zadané hodnoty.				
D-třída (100 Ω max.) zemnicí odpor.	C-třída (100 Ω max.) zemnicí odpor.	D-třída (100 Ω max.) zemnicí odpor.	C-třída (100 Ω max.) zemnicí odpor.	D-třída (100 Ω max.) zemnicí odpor.
Teplota: 5 °C až 40 °C; Vlhkost: 20% až 80% r.v. (bez kondenzace) Vibrace podlahy: frekvence max. 10 Hz max., amplituda max. 5 μ m				

* Hodnoty uvedené v tomto katalogu jsou založeny na měřících provedeních podle samostatně definovaných kontrolních standardů.

** Windows 7 / Windows Vista / Windows XP je registrovaná ochranná známka ve Spojených státech amerických a dalších zemích pro Microsoft Corporation.

Autograph AGS-X Series
Přesný univerzální zkoušební stroj

19